

Method of calculating dynamic state-of-charge within a battery

Publication number: DE10158029

Publication date: 2002-06-06

Inventor: KWOK WELLINGTON Y (US)

Applicant: DELPHI TECH INC (US)

Classification:

- **International:** G01R31/36; H01M10/44; G01R31/36; H01M10/42;
(IPC1-7): G01R31/36; H01M10/44; H02J7/00

- **European:** G01R31/36V1A; H01M10/44

Application number: DE20011058029 20011127

Priority number(s): US20000722858 20001127

Also published as:

 US6300763 (B1)

[Report a data error here](#)

Abstract not available for DE10158029

Abstract of corresponding document: **US6300763**

An apparatus and methods for determining dynamic state-of-charge of a battery that is subject to periodic charging and discharging within a system. Correction factors eta are determined for various operational conditions of current, temperature and state of charge which relate relative discharge and charge efficiency with a reference set of conditions. According to conditions, the correction factor, either calculated in real-time or retrieved as a stored value, is then applied periodically to the charge and discharge currents of the battery to adjust an estimated state-of-charge value (SOC) for the battery within the given system.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



(19) BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

(12) **Offenlegungsschrift**
(10) **DE 101 58 029 A 1**

(51) Int. Cl. 7:
G 01 R 31/36
H 02 J 7/00
H 01 M 10/44

(21) Aktenzeichen: 101 58 029.0
(22) Anmeldetag: 27. 11. 2001
(43) Offenlegungstag: 6. 6. 2002

DE 101 58 029 A 1

(30) Unionspriorität:
09/722,858 27. 11. 2000 US
(71) Anmelder:
Delphi Technologies, Inc., Troy, Mich., US
(74) Vertreter:
Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336 München

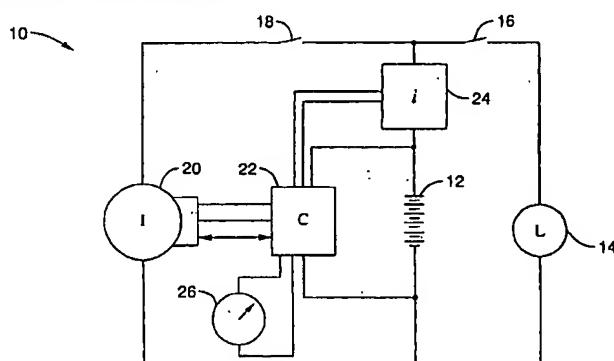
(72) Erfinder:
Kwok, Wellington Y., Fishers, Ind., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Verfahren zum Berechnen des dynamischen Ladezustandes in einer Batterie

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (10) und Verfahren zum Bestimmen eines dynamischen Ladezustandes einer Batterie (12), die einem periodischen Laden und Entladen in einem System ausgesetzt ist. Korrekturfaktoren η werden für verschiedene Betriebsbedingungen von Strom, Temperatur und Ladezustand, die mit einem relativen Entlade- und Ladewirkungsgrad in Beziehung stehen, mit einem Referenzsatz von Bedingungen bestimmt. Gemäß den Bedingungen wird dann der Korrekturfaktor, der entweder in Echtzeit berechnet oder als gespeicherter Wert herausgesucht wird, dann periodisch auf die Lade- und Entladeströme der Batterie angewandt, um einen abgeschätzten Ladezustandswert (SOC) für die Batterie (12) in dem gegebenen System einzustellen.



DE 101 58 029 A 1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft im Allgemeinen ein Batterieenergiemanagement, und im Besonderen ein Verfahren zur Bereitstellung einer korrekten Annäherung für den dynamischen Ladezustand in einer Batterie, die einem dynamischen Laden und Entladen ausgesetzt ist.

[0002] Das Verfolgen der Batterieenergie ist einer Vielfalt von Batterieenergiemanagement-Systemen, wie beispielsweise jene, die in Verbrennungsmotor- und Elektrofahrzeugen angewandt werden, entscheidend. Batterie-Energiemanagement-Systeme steuern das Laden und/oder Entladen eines Batteriekits durch eine gegebene Last. Bei vielen dieser Anwendungen, wie sie durch das elektrische System eines Verbrennungsmotor-Kraftfahrzeugs verkörpert werden, durchläuft die Batterie dynamisch Lade- und Entladezyklen. Während des Ladens ist es wichtig, die Batterieenergie zu verfolgen, um die optimale Rate zu bestimmen, mit der die Batterie aufgeladen werden soll. Während des Entladens der Batterie ist es wichtig, die relative Größe der verbleibenden Kapazität zu erkennen. Typische Verfahren, die zur Verfolgung der Energie einer Batterie benutzt werden, die einem zyklischen Laden/Entladen ausgesetzt ist, besitzen zahlreiche Nachteile.

[0003] Batterien werden typischerweise aufgrund der Tatsache, dass wiederaufladbare Batterien einen höheren Ladestrom akzeptieren können, wenn sie vollständig entladen sind, als wenn sie sich einem vollen Ladezustand nähern, mit einer variablen Rate geladen. Ein kritisches Maß, das bei Ladesystemen verwendet wird, ist das eines angestrebten Ladeprofils für einen gegebenen Batterietyp, das unter einem gegebenen Satz von Bedingungen die Laderate festlegt. Eine Laderate, die unter einem Satz von gegebenen Umständen ungeeignet ist, erhöht die Ladezeit, während eine Laderate, die unter dem gegebenen Satz von Umständen zu groß ist, ein erhöhtes Ausgasen und eine Verringerung der Batterielanglebigkeit bewirkt. Es sind daher zahlreiche Ladeverfahren verwendet worden, um eine Laderate, die für die Batterie geeignet ist, und ihr passendes Ladeprofil bereitzustellen. Beispielsweise sorgen Konstantstrom-Ladegeräte typischerweise für einen maximalen Ladestrom innerhalb einer begrenzten Spannung, so dass der Strom abfällt, wenn sich die Batterie der oberen Spannungsgrenze des Ladegerätausgangs nähert. Die Bestimmung eines passenden Ladeprofils ist jedoch mit bedingten Variablen angefüllt, die die Komplexität erhöhen, und wird weiter durch dynamisches Laden/Entladen verkompliziert. Es ist jedoch schwierig gewesen, zum Teil aufgrund der Schwierigkeit bei der Bestimmung des gegenwärtigen Ladezustandes der Batterie, fortschrittliche Lademechanismen zu schaffen, die besser in der Lage sind, die Batterie passend zu laden. Dies ist der Fall, weil die optimale Laderate einer Batterie als in großem Maße von ihrem Ladezustand (state of charge oder SOC) abhängig angesehen werden kann. Eine einfache Definition für den Ladezustand (SOC) kann ausgedrückt werden als:

$$\text{SOC} = \frac{Q_r}{Q_n} \quad (1)$$

wobei Q_r die Restkapazität der Batterie unter der Referenzbedingung ist, und Q_n die Nennkapazität der zu testenden Batterie ist (die typischerweise in Amperestunden, Ah, gemessen wird). Obwohl das Ladezustandskonzept relativ einfach ist, ist die richtige Implementierung kompliziert, da die Bestimmung der Faktoren Q_r und Q_n ein tiefes Verständnis des statischen und dynamischen Verhaltens innerhalb der Batterie erfordert. In der Literatur über Ladegeräte und Batteriesysteme ist üblicherweise ein Algorithmus zu finden, der einen Satz von mehreren SOC-Definitionen kombiniert, die irgendwie miteinander gebündelt werden, um ein abschließendes SOC-Berechnungsverfahren bereitzustellen. Beispielsweise schätzen viele Forscher die Änderung des SOC ab, indem ein einfaches Strom-Zeit-Integrationsverfahren durchgeführt wird, wie beispielsweise:

$$\Delta \text{SOC} = \frac{(i \times \Delta t)}{Q_i} \quad (2)$$

wobei i der Lade- oder Entladestrom (in Ampere, A) ist, und Δt das Zeitintervall (in Stunden, h) ist, und Q_i die Batteriekapazität (Amperestunden, Ah), wie beim Entladestrom i bestimmt ist. Die Berechnung von SOC wird deshalb oft angegeben durch:

$$50 \quad \text{SOC} = \text{SOC} + \Delta \text{SOC} \quad (3)$$

[0004] Jedoch ist die Verwendung dieses Kombinationsansatzes grundlegend und mathematisch fehlerhaft und besitzt keine physikalische Begründung. Die Summe von Gleichung (1) und Gleichung (2) in Gleichung (3) ist mathematisch inkonsistent, da diese beiden Gleichungen zwei unterschiedliche Brüche beschreiben. Der Bruch der Restkapazität hinsichtlich der Nennkapazität wird durch Gleichung (1) beispielsweise auf der Grundlage einer 20-Stunden-Rate oder C_{20} dargestellt, während die Bruchänderung in der stromabhängigen Kapazität während des Zeitintervalls durch Gleichung (2) dargestellt wird. Es wird durch Gleichung (3) keine physikalische Information geliefert, wie sie in Gleichung (1) definiert ist, da man nicht in der Lage ist, die "Restkapazität" aus dem neu berechneten SOC vorherzusagen. Zusätzlich muss jeder Verweis auf die so definierte SOC-Funktion weiter quantifiziert werden, indem die Entladerate zusammen mit der Temperatur spezifiziert wird.

[0005] In anderen Fällen ist eine Korrelation in Abhängigkeit von der Peukert-Gleichung abgeleitet worden:

$$Q_p = i^n t \quad (4)$$

wobei Q_p die charakteristische Batteriekapazität ist, n der Empfindlichkeitsexponent der Batterieentladrate ist, und t die Entladedauer ist, um eine Entladeende-Bedingung festzulegen. Deshalb kann die Dynamik von Gleichung (2) umgeschrieben werden als

$$\Delta \text{SOC} = \frac{\Delta Q_p}{Q_n} = \frac{(i^n \times \Delta t)}{Q_n} \quad (5)$$

um den Effekt auf eine Kapazitätsveränderung für unterschiedliche Entladeströme gemäß dem Peukert-Modell einzuarbeiten. Das resultierende Modell nimmt an, dass die Gesamtzunahme oder -abnahme der Kapazität (wie sie durch eine Konstantstromentladung bestimmt wird) direkt proportional zu den infinitesimalen Änderungen der nutzbaren Kapazität unter dynamischen Bedingungen ist. In der Praxis wird dieser Ansatz wegen seiner Leichtigkeit der Implementierung weitgehend akzeptiert, obwohl er nicht die Batteriedynamik mit der fundamentalen Vorhersage der "Restkapazität" (oder SOC) in Beziehung bringen kann. Infolgedessen ist die Gleichung (5) ebenso mathematisch inkonsistent, da Q_p in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt wird. ($[A] \times [h]$) wird gleichgesetzt mit $[A]^n \times [h]$). Experimentell ist auch herausgefunden worden, dass das Peukert-Modell einen ungeeigneten Ansatz liefert, um den SOC in einem dynamischen System genau zu bestimmen.

[0006] Deshalb gibt es einen Bedarf für ein Verfahren zum passenden Bestimmen und/oder Aufrechterhalten einer Ladezustandsinformation (SOC-Information) für eine Batterie, die geladen oder entladen wird. Die vorliegende Erfindung kommt diesem Bedarf sowie weiteren nach und beseitigt die Mängel der früher entwickelten Ladegerätlösungen.

[0007] Die vorliegende Erfindung stellt ein empirisches Verfahren zum Bestimmen einer genauen Annäherung für den Ladezustand (SOC) in einer Batterie unter dynamischen Lade- und Entladebedingungen bereit. Dieses Verfahren benutzt einen Ansatz, der auf einem Batteriewirkungsgrad beruht, wobei Wirkungsgradkorrekturfaktoren experimentell beschafft und auf gemessene Lade- und Entladeraten unter einem Satz von Bedingungen angewandt werden, um den gegenwärtigen SOC genau abzuschätzen. Der Korrekturfaktor beschreibt dadurch allgemein die Effektivität der Stromübertragung mit der Batterie. Korrekturfaktoren, oder Parameter, aus denen Korrekturfaktoren berechnet werden können, sind als ein Datensatz oder in einem Gleichungsformat gespeichert. Unter Betriebsbedingungen wird der Ladezustand in der Batterie unter Verwendung des Korrekturfaktors gemäß den gegenwärtigen Bedingungen berechnet, um die gemessenen Niveaus einer Stromübertragung mit der Batterie über das Zeitintervall zu korrigieren. Das Verfahren sorgt für eine genaue Abschätzung des Ladezustandes, selbst wenn das System dynamischen Lade/Entlade-Bedingungen ausgesetzt ist. Beispiele von Systemen, die die Batterie einem dynamischen Laden und Entladen aussetzen, umfassen: in einem Fahrzeug befindliche Ladesysteme, bei denen die 12-Volt-Batterie während der Fahrt auf der Straße geladen wird, und die verschiedenen Entladenebenen während des Startens, des Leerlaufs und des Verlangsamens ausgesetzt ist; Hybridelektrofahrzeuge; und Stopp-Start-Systeme. Diese Umgebungen eines dynamischen Ladens/Entladens erfordern es, dass die Batterie zunächst ein Speichern von Energie und ein Zuführen von Energie zyklisch durchläuft. Das praktische Ausführen des Verfahrens umfasst, dass zunächst Batterien auf eine Standardreferenz normiert werden, um eine begründete Korrelation unter verschiedenen Betriebsbedingungen bereitzustellen. Die Standardreferenz ist ein Entladen mit einer 20-Stunden-Rate hinunter bis zur 10,5 V bei einer Temperatur von 25°C, und alle Batterie-"Aktivitäten" müssen auf diese Referenzbedingung normiert werden. Die Annäherung in Gleichung (2) wird deshalb durch die empirische Korrelation ersetzt:

$$\Delta \text{SOC} = \frac{(\eta \times i \times \Delta t)}{Q_n} = \frac{\eta \times \Delta Q_i}{Q_n} \quad (6)$$

wobei η ein Korrekturfaktor ist, der den Lade- oder Entladestrom i mit der Referenzbedingung mathematisch in Beziehung bringt, und $\Delta Q_i = (i \times \Delta t)$ die Änderung der Amperestundenkapazität ist. Der resultierende Ladezustand (der wieder durch $\text{SOC} = \text{SOC} + \Delta \text{SOC}$ angegeben wird) wird somit durch die exakte Kapazität wiedergespiegelt, die in der Batterie unter den Referenzbedingungen gehalten wird. Alle Ströme werden durch Substituieren von

$$\frac{i}{Q_n}$$

mit einem normierten Ausdruck oder einem äquivalenten Strom φ weiter vereinfacht, so dass

$$\varphi = \frac{i}{Q_n} \quad (7)$$

was zulässt, dass die abgeleitete Korrelation auf Batterien mit ähnlicher Konstruktion angewandt werden kann, die beispielsweise eine ähnliche aktive Masse, P/N-Verhältnis und Masse/Säure-Verhältnis aufweisen können. Außerdem kann die Korrelation auf gealterte Batterien der gleichen Konstruktion angewandt werden, die eine lineare Reduktion ihrer nutzbaren Kapazität zeigen.

[0008] Während des Ladens steht der Ladekorrekturfaktor in enger Beziehung mit der Batterieladeakzeptanz. Die Ladeakzeptanzfähigkeit der Batterie nimmt aufgrund der Masseübertragung und von Materialbegrenzungen schnell ab, wenn sich die Batterie ihrem vollen Ladezustand nähert. Eine zeitliche Integration des Ladestroms führt deshalb im Allgemeinen zu einer unrealistischen Abschätzung von SOC, die 100% übersteigen kann. Zahlenfehler dieser Natur können leicht in bestimmten Anwendungen, wie beispielsweise Labortests und bestimmten Elektrofahrzeuganwendungen, die keinem dynamischen Laden und Entladen ausgesetzt sind, überwunden werden. Bei diesen nicht dynamischen Batteriesystemen fährt eine numerische Integration fort, bis der berechnete Ladezustand eine vorbestimmte "Überladungsgradschwelle" erreicht, wie beispielsweise 105% bis 125%, woraufhin der SOC-Messer vor den anschließenden Entlade- oder Arbeitsspieltests auf 100% zurückgesetzt wird. Auf diese Weise korrigiert das Verfahren einen "bekannten" vollen Ladezustand. Jedoch leitet diese direkte Integrationstechnik abhängig von Eingangsladeraten und SOC wesentliche kumulative Fehler ein, wenn sie in Kraftfahrzeugen und anderen dynamischen Anwendungen benutzt wird, bei denen sel-

DE 101 58 029 A 1

ten vollständig aufgeladene Bedingungen erzielt werden. Typische in einem Fahrzeug vorgenommene SOC-Berechnungen zeigen dadurch merkliche Fehler, und sie können nicht periodisch initialisiert werden, da der SOC selten einen bekannten, stabilen, vollen Ladungswert erzielt.

[0009] Der Effekt der Batterieentladerate auf SOC-Berechnungen wird gewöhnlich vernachlässigt, obwohl er eine wichtige Rolle bei der genauen SOC-Abschätzung spielt. Ein Entladen mit einer niedrigen Rate fördert im Allgemeinen eine gleichmäßige Materialumwandlung in einer Elektrode, die vorwiegend als aufgrund einer allmählichen Diffusion von Elektrolyt in den Porenraum und eine langsame elektrochemische Reaktion auftretend angesehen wird. Im Kontrast führt eine hohe Entladerate im allgemeinen zu einer unvollständigen Umwandlung, die in großem Maße nur Oberflächenmaterial umfasst, zum großen Teil aufgrund der Bildung von Bleisulfatteilchen auf Elektrodenoberflächen, die physikalisch verhindern können, dass Elektrolyt in das Innere der Elektrode eindringt, so dass die nutzbare Kapazität der Batterie effektiv verringert wird. Eine direkte Integration des Entladestromes liefert daher eine Überschätzung der nutzbaren Kapazität der Batterie.

[0010] Es ist ein Ziel der Erfindung, ein Verfahren zum Verfolgen eines Batterieladezustandes unter dynamischen Lade- und Entladebedingungen zu schaffen.

[0011] Es ist ein anderes Ziel der Erfindung, die Rate zu berücksichtigen, mit der die Batterie entladen wird, wenn der Batterieladezustand berechnet wird.

[0012] Ein anderes Ziel der Erfindung ist es, ein Verfahren bereitzustellen, bei dem Berechnungsfehler in Systemen, die das erforderliche Verfahren anwenden, leicht korrigiert werden können.

[0013] Ein anderes Ziel der Erfindung ist es, kleine Änderungen des Batterieladezustandes während sowohl des Ladens als auch des Entladens genau anzunähern.

[0014] Ein anderes Ziel der Erfindung ist es, Berechnungen zu vereinfachen, die in einem Ladesystem durchgeführt werden.

[0015] Ein anderes Ziel der Erfindung ist es, einen Ladezustand zu berechnen, indem Korrekturfaktoren benutzt werden, die aus simulierten Betriebsbedingungen bestimmt werden.

[0016] Ein anderes Ziel der Erfindung ist es, für eine Berechnung eines Ladezustandes zu sorgen, indem Korrekturfaktoren benutzt werden, die in Echtzeit auf der Grundlage von Batterieeigenschaften berechnet werden, deren Parameter für die Berechnung gespeichert wurden.

[0017] Es ist ein anderes Ziel der Erfindung, Normierungstechniken zu liefern, die die Anwendung der erforderlichen Techniken über einen weiten Bereich von Typen, Größen und Bedingungen von Batterien erlauben.

[0018] Weitere Ziele und Vorteile der Erfindung werden in den folgenden Teilen der Beschreibung hervorgebracht, wobei die detaillierte Beschreibung zum Zweck des vollständigen Offenbares bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung dient, ohne dieser Beschränkungen aufzuerlegen.

[0019] Die Erfindung wird im Folgenden beispielhaft anhand der Zeichnungen beschrieben, in diesen ist:

[0020] Fig. 1 ein vereinfachtes Schema eines Batterieenergiesystems, das einen elektrischen Energiesystem-Controller enthält, der das Verfahren zum Berechnen des Ladezustandes in einem Batteriesystem gemäß der vorliegenden Erfindung benutzt,

[0021] Fig. 2 ein Graph der Batteriespannung als eine Funktion des Ladezustandes in einer Batterie, die geladen wird,

[0022] Fig. 3 ein Graph des Materialumwandlungswirkungsgrades, wobei ein Satz von Ladespannungsprofilen als eine Funktion des Ladezustandes in der Batterie gezeigt ist,

[0023] Fig. 4 ein Graph der Batteriespannung als eine Funktion des Ladezustandes in der Batterie bei einer Temperatur von 25°C, bei dem der Beginn des Überladens veranschaulicht ist,

[0024] Fig. 5 ein Graph der Batteriespannung als eine Funktion des Ladezustandes in der Batterie bei einer Temperatur von 50°C, bei dem der Beginn des Überladens veranschaulicht ist,

[0025] Fig. 6 ein Graph des kritischen Ladestromes in einer Batterie als eine Funktion des Ladezustandes,

[0026] Fig. 7 ein Graph der Batteriespannung und -kapazität, bei dem Schritte zum Bestimmen von Batterieentladekorrekturfaktoren veranschaulicht sind,

[0027] Fig. 8 ein Graph der Batteriespannung und der wiedergewonnenen Kapazität während des Entladens bei einer Temperatur von -29°C,

[0028] Fig. 9 ein Graph der Batteriespannung und der wiedergewonnenen Kapazität während des Entladens bei einer Temperatur von -18°C,

[0029] Fig. 10 ein Graph der Batteriespannung und der wiedergewonnenen Kapazität während des Entladens bei einer Temperatur von 0°C,

[0030] Fig. 11 ein Graph der Batteriespannung und der wiedergewonnenen Kapazität während des Entladens bei einer Temperatur von 25°C,

[0031] Fig. 12 ein Graph der Batteriespannung und der wiedergewonnenen Kapazität während des Entladens bei einer Temperatur von 52°C,

[0032] Fig. 13 ein Graph der Batterieentladung unter Referenzbedingungen für ein alternatives Verfahren zum Bestimmen des Entladekorrekturfaktors,

[0033] Fig. 14 ein Graph der Batterieentladung unter Testbedingungen zur Verwendung in Verbindung mit den Daten von Fig. 13; und

[0034] Fig. 15 ein Graph der Batteriespannung als eine Funktion der Entladezeit für eine Reihe von Batterien, um eine durchschnittliche Entladekapazität zu veranschaulichen.

[0035] Die vorliegende Erfindung ist in den in den Fig. 1 bis 15 zu Veranschaulichungszwecken allgemein gezeigten Vorrichtung ausgeführt. Es ist festzustellen, dass die Vorrichtung hinsichtlich der Ausgestaltung und hinsichtlich der Details der Teile variiert kann, und dass das Verfahren hinsichtlich der besonderen Schritte und Abfolge variieren kann, ohne von den hierin offenbarten Grundkonzepten abzuweichen.

[0036] Die vorliegende Erfindung sorgt für ein Bestimmen und/oder Aufrechterhalten eines Maßes des Ladezustandes in einer Batterie infolge eines Verfolgens von Batterieenergieeingängen und -ausgängen, die durch Anwenden von Kor-

DE 101 58 029 A 1

rekturfaktoren auf Zeitinkrementen von gemessenen Lade- und Entladeströmen bestimmt werden. Die vorliegende Erfindung ist auf eine Vielzahl von chemischen Batterieeigenschaften anwendbar, da sie in Verbindung mit gemeinsamen elektrochemischen Prinzipien arbeitet. Fig. 1 zeigt ein Batterieenergiesystem 10, das für eine Anwendung typisch ist, bei der eine Batterie einer Last Energie zuführen kann und durch eine Stromquelle wiederaufgeladen wird. Energie wird aus einem Batteriepaket 12, das mit einer Last 14 verbunden ist, gezogen. Die Last 14 kann irgendeine Einrichtung darstellen, der elektrische Energie zugeführt wird, wie beispielsweise ein elektrischer Anlasser eines Kraftfahrzeugs, elektrische Zusatzeinrichtungen, Motoren usw. Optionale Schalter 16, 18 werden typischerweise bei Offline-Ladeanwendungen verwendet, wie beispielsweise bei Elektrofahrzeugen, bei denen die Batterie entweder geladen wird oder der Last Energie liefert. Das Ladegerät umfasst eine programmierbare Stromquelle 20, die der Batterie 12 einen Ladestrom führt, und einen Energiemanagement-System-Controller 22, der derart gezeigt ist, dass er einen Satz von Spannungseingängen und einen Strommesseingang von einem Strommesssensor 24 (oder Kurzschlusswiderstand) aufweist, was es dem Controller erlaubt, eine gleichzeitige Steuerung der Stromquelle 20 während des Ladebetriebes bereitzustellen und Batterieinformation externen Zusatzeinrichtungen, beispielsweise der Ladezustandsanzeigeeinrichtung 26, zu übermitteln. Das Verfahren zum Bestimmen von SOC in der vorliegenden Erfindung ist derart verkörpert, dass es in dem Controller 22 des Systems implementiert ist, so dass ein passendes Laden des Batteriepakets 12 durchgeführt werden kann, während der abgeschätzte Ladezustand vorzugsweise auch an der SOC-Anzeigeeinrichtung 26 registriert wird. Es ist festzustellen, dass die vorgeschlagenen Ladezustandsbestimmungsverfahren zusätzlich für zahlreiche und veränderte Zwecke in Systemen benutzt werden können, denen eine Batterie zugeordnet ist, die wiederaufgeladen werden kann.

[0037] Fig. 2 zeigt ein Diagramm 30 der Batteriespannung als eine Funktion des Ladezustandes (SOC) für eine Batterie, die durch das Konstantstromverfahren (CI-Verfahren) geladen wird. Die gemessene Batteriespannung 32 folgt der Gleichgewichtsspannung 34, wobei der Potentialunterschied durch eine Kombination aus ohmschem Spanungsabfall 36 und Polarisierung 38 berücksichtigt wird. Die gemessene Spannung folgt im Allgemeinen der Tafel-Beziehung bis zu einem Gasbildungspunkt 40, der, abhängig vom angelegten Strom, typischerweise zwischen 50% und 80% SOC auftritt. In dem Spannungsdiagramm ist festzustellen, dass der Beitrag auf den Spannungsabfall von dem ohmschen Widerstand relativ konstant bleibt. Die plötzliche Zunahme der gemessenen Spannung 42 fällt mit einer entsprechenden Abnahme der Ladeakzeptanzfähigkeit aufgrund einer Verarmung von aktiven Reaktionsstellen und einer physikalischen Blockade der Säurediffusion aufgrund der Produktion von Gasblasen zusammen, so dass eine Bedingung mit hohem zu Tage tregenden Widerstand auftritt. Deshalb wird der effektive Ladestrom, der eine chemische und ionische Polarisierung an der Oberfläche der Elektroden einleitet, dementsprechend reduziert. Man geht davon aus, dass ein Überladungspotential 44 in diesem Bereich der Kurvendivergenz vorhanden ist, wenn die Batterieladeenergie zunehmend in den Überladereaktionen verbraucht wird, im Gegensatz einer nutzbaren elektrochemischen Umwandlung bei der Annäherung an ein 100% Ladezustandsniveau 46.

[0038] Fig. 3 zeigt bei 50 die analogen Effekte auf den Ladewirkungsgrad als effektive Ladespannungskurven 52a bis 52f ausgedrückt, die spezifischen Ladestromniveaus zugeordnet sind, die als eine Funktion von SOC gezeigt sind. Die "effektive Ladespannung" ist das Antriebspotential, das dem Niveau des Ladestromes entspricht, das von der Batterie akzeptiert wird, und das nicht in Richtung von Überladereaktionen innerhalb der Batterie geht. Die Spannungsprofile 52a bis 52f porträsentieren die angesammelten ohmschen und Polarisierungsspannungen in Abhängigkeit von variierenden Niveaus des Ladestromes, wobei die oberste Kurve 52f den höchsten dieser angelegten Ladestrome darstellt, während Kurve 52a die Batteriegleichgewichtsspannung darstellt. Es ist aus den Kurven festzustellen, dass bei niedrigen SOC-Werten der Ladewirkungsgrad nahezu 100% beträgt, da der Hauptteil des Energieeingangs zur Materialumwandlung benutzt wird. Wenn sich die Batterie ihrem vollen Ladezustand nähert, wird ein zunehmender Teil der eingegebenen Energie zu Überladereaktionen und ohmschem Erwärmung umgelenkt. Die gestrichelten Linien 52b' bis 52f stellen die gemessene Ladespannung dar, die im Wesentlichen die Summe der effektiven Polarisierung und des Überladepotentials ist. Die effektive Polarisierung kann in großem Maße durch Ladungstransfer, Konzentration und ohmsche Beiträge gekennzeichnet werden. Der Anfangswendepunkt der Ladespannungskurven gibt den Beginn des Überladens an, was im großen Maße durch das Niveau des Ladestromes bestimmt wird. Eine gestrichelte Linie 54, die die Kurven 52b-52f schneidend gezeigt ist, gibt den Anfangsspannungswendepunkt bei jeder Kurve an, wobei größere Ladestrome bei niedrigeren Werten von SOC divergieren, was einen dementsprechenden Ladewirkungsgradverlust widerspiegelt. Beim Erzielen eines vollen Ladezustandes 56 (100% SOC) wird jeder zusätzlicher Energieeingang in die Batterie in eine Förderung von Aktivitäten, die kein Material umwandeln, umgeleitet, so dass der resultierende Ladewirkungsgrad auf beinahe Null abfällt.

[0039] Dementsprechend kann ein Ladewirkungsgrad-Korrekturfaktor η_c bestimmt werden als

$$\eta_c = \frac{\phi_{\text{eff}}}{\phi_c} \quad (8)$$

wobei ϕ_{eff} der effektive Ladestrom allein zur Materialumwandlung ist, und ϕ_c der angelegte Ladestrom ist. Beide Ausdrücke sind gemäß einem normierten Strom ausgedrückt, wie er in Gleichung (7) definiert ist.

[0040] Gemäß einem gegebenen SOC in Fig. 3 ist ein folgender maximaler oder "kritischer" Ladestrom Q_{kritisch} vorhanden, unter dem der Ladewirkungsgrad im Wesentlichen 100% beträgt. Ein Erhöhen des Ladestromes bei einem gegebenen SOC über diesen kritischen Strom hinaus bewirkt eine entsprechende Abnahme des Ladewirkungsgrades. Deshalb ist im Allgemeinen der effektive Ladestrom als dem kritischen Strom äquivalent anzusehen, was erlaubt, dass Gleichung (8) angenähert werden kann durch:

$$\eta_c, (\phi, \phi_c) = \frac{\phi_{\text{kritisch}}(\phi)}{\phi_c} \quad (9)$$

[0041] Es ist festzustellen, dass, wenn der Ladestrom reduziert wird, der Ladeprozess zunehmend effizient wird und

DE 101 58 029 A 1

sich theoretisch 100% Wirkungsgrad bei einem unendlich niedrigen Niveau von angelegtem Ladestrom nähert.

[0042] Der kritische Punkt, an dem Überladungsreaktionen schnell ansteigen, kann experimentell während des Ladens der Batterie aus den in den Fig. 4 und 5 veranschaulichten Konstantstrom-Ladeprofilen bestimmt werden, die erzeugt werden aus einem Anfangs-SOC von 60% und bei Temperaturen von 25°C in Fig. 4 und 50°C in Fig. 5 wiederaufgeladen. Die Testbatterien bei diesen Experimenten wurden zuerst auf ungefähr 60% SOC entladen und im Anschluss an einen Ruhezeitraum von mindestens 8 Stunden wieder mit Raten von 3,45, 7,5, 15, 25, 35 und 45 Ampere wiederaufgeladen. Die entsprechenden Ladespannungsprofile wurden unter Verwendung eines Hochgeschwindigkeits-Datenbeschaffungssystems aufgezeichnet und über den abgeschätzten SOC für die Batterie aufgetragen. Die Überladebeginn-Bedingung, wie sie durch die Markierungen in den Fig. 4 und 5 veranschaulicht ist, wurde "manuell" bestimmt, indem der lineare Teil jedes Spannungsprofils verlängert wurde, und der entsprechende SOC am Wendepunkt abgelesen wurde. Alternativ kann der Wendepunkt mittels Berechnungen bestimmt werden, die an den Spannungsprofildaten durchgeführt werden, oder indem die Gasströmungsrate sorgfältig überwacht wird.

[0043] Fig. 6 fasst den kritischen Ladestrom als eine Funktion des Batterie-SOC sowohl bei 25°C als auch bei 50°C zusammen. Das Diagramm kennzeichnet den spezifischen Ladestrom bei jedem spezifischen Wert des Ladezustandes, bei dem ein Überladen beginnt. Der kritische Ladestrom ist wichtig, um den Ladewirkungsgrad als eine Funktion des Ladezustandes zu bestimmen. Mathematisch kann der kritische Ladezustand als eine stetige Funktion ausgedrückt werden als:

$$\ln\varphi_{\text{kritisch}} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln\phi \quad (10)$$

wobei $\varphi_{\text{kritisch}}$ der normierte kritische Strom bei dem entsprechenden SOC ϕ , ist und α_0 zusammen mit α_1 die empirischen Koeffizienten sind. Die Regressionskurven für 25°C und 50°C, wie sie in Fig. 6 gezeigt sind, folgen den Gleichungen

$$\ln\varphi_{\text{kritisch}} = -6,4799 - (22,2485 \ln\phi) \quad [\text{bei } 25^\circ\text{C}] \quad (11)$$

$$\ln\varphi_{\text{kritisch}} = -7,6485 - (25,4385 \ln\phi) \quad [\text{bei } 50^\circ\text{C}] \quad (12)$$

und die abgeschätzten Ladekorrekturfaktoren η_c sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Bzgl. Tabelle 1 ist daran zu erinnern, dass der normierte Ladestrom der angelegte Ladestrom dividiert durch die Batteriekapazität ist, so dass 0,05 gleich eine Laderate von C/20 ist, während 1,0 gleich eine Rate von C ist. Es ist festzustellen, dass der kritische Wert des Stromes direkt aus Gleichung (10) wie folgt berechnet werden kann:

$$\varphi_{\text{kritisch}} = e^{\alpha_0 + \alpha_1 \ln\phi} \quad (13)$$

[0044] Der kritische Strom kann dann mit dem normierten Ladestrom in Beziehung gebracht werden, um den Ladekorrekturfaktor wie folgt zu bestimmen:

$$\eta_c = \varphi_{\text{kritisch}} / \varphi_{\text{normal}} \quad (14)$$

[0045] Diese derart abgeleiteten Korrekturwerte können im laufenden Betrieb gespeichert oder berechnet und inkrementell angewandt werden, um den Ladezustand auf der Grundlage von Ladeströmen unter den festgelegten Betriebsbedingungen zu korrigieren.

[0046] Das Bestimmen eines Satzes von Entladekorrekturfaktoren η_d ist ein komplexerer Prozess als die Bestimmung von Ladekorrekturfaktoren η_c . Um mit der hierin verwendeten Definition von SOC, wie sie in Gleichung (1) definiert wurde, konsistent zu bleiben, ist es notwendig, SOC-Werte mit den "Restkapazitäten" in einer Batterie in Bezug auf die Nennkapazität der Batterie unter den gegebenen Referenzbedingungen in Beziehung zu bringen.

[0047] Als Beispiel wird eine Batterie mit 50 Ah (Amperestunden), deren Kapazität auf einer 20-Stunden-Entladerate oder "C₂₀-Rate" beruht, als Referenz benutzt. Eine Betrachtung eines SOC-Niveaus von 80% in der Batterie bezieht sich auf den Ladezustand, bei dem die Batterie in der Lage ist, 2,5 A für exakt 16 Stunden zu liefern, bevor sie 10,5 V erreicht. Als ein weiteres Beispiel wird der SOC der gleichen Batterie nach dem Entladen mit einer Konstantstromrate von annähernd 20 A für 20 Minuten durch Entladen der Restkapazität der Batterie mit dem Referenzstrom von 2,5 A, bis die Spannung unter 10,5 V abfällt, was in Gleichung (1) definiert ist, bestimmt. Deshalb kann der Entladekorrekturfaktor η_d , der in Gleichung (6) definiert ist, als das Verhältnis der "äquivalenten Kapazität, die unter Standardbedingungen weggemommen wird" zu der "integrierten Kapazität, die unter den spezifischen Betriebsbedingungen weggemommen wird" ausgedrückt werden, was gegeben ist durch:

$$\eta_d = \frac{\Delta Q_r}{\Delta Q_i} \quad (15)$$

[0048] Es ist hervorzuheben, dass die obige Bestimmung nur für infinitesimale Kapazitätsänderungen gilt, und dass sonst die resultierende Gleichung das mathematische Äquivalent von Gleichung (2) bei Substitution in Gleichung (6) wird.

[0049] Die Entladekapazität kann unter jeder Bedingung mit der Referenzkapazität mittels empirischen Testens in Beziehung gebracht werden, wobei angenommen wird, dass (1) die Änderung des Batterieleistungsvolumens eine lineare Funktion der weggemommenen Kapazität ist, und (2) die Batteriebedingungen am Ende des Entladens für jedes Niveau an Entladestrom identisch sind. Fig. 7 veranschaulicht ein Batteriespannungsprofil in Abhängigkeit von der unten beschriebenen experimentellen Abfolge zum Abschätzen eines Korrekturfaktors η_d , während die Testbatterie mit einer 25A-Rate bei einer Temperatur von 52°C von einem Anfangs-SOC von 80% entladen wird. Die Testbatterie erfährt ein

DE 101 58 029 A 1

Entladen 72 mit einer C_{20} -Rate bis zu einem vorbestimmten SOC bei 25°C (Standardreferenzbedingung), während die weggenommene Amperestundenkapazität als Q_1 aufgezeichnet wird. Gemäß der Produktspezifikation wurde eine 20 h Nennkapazität von 69 Ah, d. h. C_{20} -Rate, gleich 3,45 A, bei diesem Schritt bei der Vorbereitung der Batterie für diesen Ausgangszustand verwendet. Die Restkapazität Q_2 wird dann berechnet, indem die weggenommene Kapazität Q_1 von dem für die Batterie gegebenen Nennkapazitätswert subtrahiert wird. Die Batterie konnte über einen Zeitraum von acht Stunden bei 25°C ruhen, 74, um eine Gleichgewicht zu erzielen, wonach die Batterie mit zusätzlichen acht Stunden Ruhe bei 52°C versehen wurde, um sie auf einer Endtemperatur zu durchwärmten. Der erste achtstündige Ruhezeitraum wird eingerichtet, um einen äquivalenten Gleichgewichtszustand für alle Einheiten zu schaffen. Vorzugweise wird eine Last, wie beispielsweise 20 mA, während der letzten acht Stunden vor dem Testen mit der Batterie verbunden, um die parasitäre Belastung zu simulieren, die in einem Fahrzeugenergiesystem vorhanden ist. Ein vernünftiger Lastwertbereich würde typischerweise zwischen 15 bis 200 mA liegen, wobei die höheren Werte anspruchsvollen Zusatzeinrichtungen, wie beispielsweise Sicherheitssystemen und Nachföhrensystemen, entsprechen. Das Entladen 76 der Batterie wird dann mit dem vorbestimmten Teststrom durchgeführt, bis die gemessene Batteriespannung 10,5 V erreicht, während die weggenommene Amperestundenkapazität als Q_3 aufgezeichnet wird. Die Batterie wird dann zur Standardreferenzbedingung 78 von 25°C zurückgeführt und kann mindestens acht Stunden ruhen. Schließlich wird ein Entladen 80 der Batterie mit einer C_{20} -Rate durchgeführt, bis die Spannung auf 10,5 V abgesunken ist, was die Restkapazität Q_4 bestimmt.

[0050] Die Fig. 8 bis 12 veranschaulichen eine vollständige empirische Testmatrix, in der Entladekorrekturfaktoren bei fünf unterschiedlichen Temperaturen (-29°C, -18°C, 0°C, 25°C und 52°C) und fünf Entladeraten (3,45, 10, 25, 35 und 45 A) bestimmt wurden. Jeder Test wurde in der gleichen Abfolge durchgeführt, mit der Ausnahme, dass für Tests bei einer Temperatur bei oder unter 0°C der Ruhezeitraum auf 16 Stunden verlängert wurde.

[0051] Der Anfangs-SOC wird auf der Grundlage der abgeschätzten Restkapazität Q_2 berechnet:

$$SOC_{Anfang} = \left(\frac{Q_2}{Q_n} \right) \times 100\% = \left(\frac{Q_n - Q_1}{Q_n} \right) \times 100\% \quad (16)$$

[0052] In dieser Gleichung wird Q_n unter Verwendung einer linearen Interpolation aus der Abnahme der Kapazität bestimmt, wie sie während der Anfangszyklen beobachtet wird,

$$Q_n = Q_n^0 \times (\Delta Q_n \times N_{Zyklus}) \quad (17)$$

wobei Q_n^0 die Anfangskapazität einer neuen Batterie (= $63,37 \pm 1,23$ Ah) ist, ΔQ_n die durchschnittliche Kapazitätsabnahme pro Tiefentladungszyklus ist ($\approx -1,529$ Ah/Zyklus) und N_{Zyklus} die Anzahl von Zyklen ist. Der End-SOC am Ende des Testentladens wird berechnet durch:

$$SOC_{Ende} = \left(\frac{Q_4}{Q_n} \right) \times 100 \% \quad (18)$$

[0053] Ein Beispiel des 35A-Entladetests bei fünf unterschiedlichen Temperaturen ist in Fig. 8 veranschaulicht, wobei die Datenpunkte von den Schritten 4 und 5 in dem Graphen weggelassen sind, um die Klarheit zu verbessern. Bei hoher Temperatur kann die Batterie mit einer relativ hohen Rate, gemessen in Amperestunden, selbst bei niedrigem SOC entladen werden. Wenn die Temperatur auf Niveaus unter dem Gefrierpunkt reduziert wird, nimmt die Fähigkeit der Batterie ab, hohe Entladeraten zu liefern, und bei niedrigen SOC-Niveaus bei Temperaturen weit unter Null kann die Batterie nur magere Entladeströme liefern. Der Zusammenhang zwischen der wiedergewinnbaren Kapazität und der Entladerate folgt lose dem linearen Peukert-Modell, obwohl es deutlich nicht in der Lage war, ein stabiles Verhalten zu zeigen, wie es bei jedem SOC-Niveau zu erwarten wäre. Wie es zuvor beschrieben wurde, ist der Peukert-Ansatz auch nicht in der Lage, den End-SOC (auf der Grundlage der C_{20} -Rate) vorherzusagen, sobald die Batterie die Entladeende-Bedingung erreicht, und er steht nicht mit finiten SOC-Änderungen unter dynamischen Bedingungen in Beziehung.

[0054] Dementsprechend kann jede Änderung in dem Referenz-SOC als Entladekorrekturfaktor ausgedrückt bestimmt werden, wie es in Gleichung (15) für unterschiedliche Entladeraten und Temperaturen festgestellt ist. Dieser Faktor kann aus unseren experimentellen Daten wie folgt angenähert werden:

$$\eta_d = \frac{\Delta Q_r}{\Delta Q_i} \cong \frac{Q_2 - Q_4}{Q_3} \quad (19)$$

wobei der Ausdruck ($Q_2 - Q_4$) die erwartete Kapazität darstellt, die unter der Standardreferenzbedingung, d. h. 25°C und C_{20} -Rate, für diese Batterie verfügbar ist, die von dem gleichen Anfangs-SOC bis zum gleichen End-SOC entladen wird. Die erwartete Kapazität wird dann durch die gemessene Kapazität, die unter den Testbedingungen weggenommen wird, Q_3 , dividiert. In der Praxis sind die Entladeraten im Allgemeinen höher als die Referenzbedingungen, was zu einem niedrigeren Materialumwandlungswirkungsgrad und folglich einem Entladekorrekturfaktor führt, der normalerweise größer als Eins ist, mit der Ausnahme, wenn bei hoher Temperatur gearbeitet wird. Anders gesagt, gibt ein großer Entladekorrekturfaktor lid einen schlechten Materialumwandlungswirkungsgrad während des Entladens relativ zu Referenzentladebedingungen an. In Tabelle 2 wird eine Beschreibung der physikalischen Regeln präsentiert, unter denen unterschiedliche Bereiche des Endladekorrekturfaktors η_d erhalten werden können. Tabelle 3A und 3B liefern Veranschaulichungsbeispiele von Entladekorrekturfaktoren, die für die Referenzbatterien in jedem Test bestimmt wurden.

[0055] Die Peukert-Korrelationen, wie sie beschrieben wurden, stellen keinen Mechanismus zum Bestimmen der Batteriekapazität in einem System bereit, das Veränderungen bei den Entladeströmen bei unterschiedlichen SOC-Niveaus

DE 101 58 029 A 1

ausgesetzt ist. Jedoch sorgt die vorliegende Erfindung für die Anwendung der Peukert-Korrelationen über infinitesimale Intervalle und für das Anwenden gespeicherter Parameter auf der Grundlage der Bedingungen von Temperatur, Entladerrate und Ladezustand, um Korrekturfaktoren zu bestimmen. Durch Anwenden der Korrelation unter Verwendung dieses Verfahrens kann eine gute Annäherung des Korrekturfaktors bestimmt werden. Die Peukert-Korrelation ist gegeben durch:

$$\eta = \gamma_0 + \gamma_1 \ln\phi + \gamma_2 \ln\varphi \quad (20)$$

[0056] Die Parameter γ_0 , γ_1 und γ_2 beschreiben die Relationen erster und zweiter Ordnung der Batteriekapazität in Bezug auf den SOC und die Entladerrate logarithmisch ausgedrückt, während ϕ der Entladestrom und φ der gegenwärtige Ladezustand ist. Wenn der Ladestrom niedriger als der kritische Ladestrom ist (bei dem ein Überladen beginnt), wie dies durch Gleichung (10) bestimmt wird, wird dann der Ladewirkungsgrad als 100% mit einem Korrekturfaktor von Eins angesehen. Ein Satz von Regressionskoeffizienten wurde für den gleichen Satz von Batterien bestimmt, wobei diese Koeffizienten in Tabelle 4 aufgelistet sind. Es ist festzustellen, dass diese Korrekturen "im laufenden Betrieb" in einem arbeitenden System oder als ein Mittel zum Schaffen einer Matrix von gespeicherten Korrekturfaktoren berechnet werden können.

[0057] Es kann ein anderes Verfahren zum Bestimmen des Entladekorrekturfaktors η_d durchgeführt werden, das nicht auf einer berechneten Batteriekapazität beruht, um die Restkapazität zu bestimmen. Die Fig. 13 und 14 veranschaulichen Entladeprofile, bei denen der Entladekorrekturfaktor η_d experimentell unter Verwendung eines Paares von identischen Batterien abgeleitet wird, die vor dem Beginn der Tests vollständig geladen wurden. Die Spannungskurve in Fig. 13 zeigt das Entladen einer Batterie unter einem Satz von Referenzbedingungen, die beispielhaft als eine C_{20} -Entladerrate bei einer Temperatur von 25°C angegeben sind, bis zu einem vorbestimmten Amperestundenzustand 82, wobei ein Kapazitätsverlust Q_1 aufgezeichnet wird. Nachdem die Batterie ruhen und ins Gleichgewicht gelangen konnte, schreitet das Entladen wieder fort, bis die Batterie ein vorbestimmtes Ende der Entladebedingung 84 erreicht, wobei ein Kapazitätsverlust Q_2 aufgezeichnet wird. Es ist daher festzustellen, dass die Nennkapazität für die Batterie unter den Referenzbedingungen durch $Q_1 + Q_2$ gegeben ist. Fig. 14 veranschaulicht das Entladen einer identischen Batterie unter einer Mischung von Referenz- und Nichtreferenz-Bedingungen. Die zweite Batterie wird einem identischen Anfangsentladen und einem Ruheintervall 86 unterzogen, die ein identisches Q_1 ergeben sollten. Nach dem Erreichen des Gleichgewichts wird die zweite Batterie dann für ein Intervall bei irgendeiner gegebenen Testbedingung einer Entladerrate und Temperatur entladen, während die Kapazität, die unter der Testbedingung weggenommen wird, ΔQ_i , als Q_3 aufgezeichnet wird. Nach einem geeigneten Ruhezeitraum, um ein Gleichgewicht zu erreichen, wird dann die Batterie bis zur Entladeende-Schwelle bei den Referenzbedingungen entladen, während der Kapazitätsverlust Q_4 aufgezeichnet wird. Der äquivalente Kapazitätsverlust unter den Referenzentladebedingungen ist die Differenz ($Q_2 - Q_4$), die sich der Differenz in der Restkapazität annähert, als ob die zweite Batterie unter den Referenzbedingungen entladen wurde. Indem die beiden Maße des Kapazitätsverlustes in Beziehung gebracht werden, kann ein Entladekorrekturfaktor η_d wie bei Gleichung (19) für die gegebenen Bedingungen, unter denen Q_3 aufgezeichnet wurde, geliefert werden. Indem eine Matrix aus Entladerraten und Temperaturen getestet wird, während Q_3 aufgezeichnet wird, kann ein empirisches Modell von η_d unter jeder Bedingung konstruiert werden. Diese Korrekturfaktoren können dann dazu verwendet werden, eine dreidimensionale Nachschlagetabelle oder eine Regressionsfunktion zu besetzen, die einen Wert für η_d als eine Funktion des Ladezustandes, der Temperatur und der Entladerrate liefert.

[0058] Ein genaues Vergleichen der Kapazitäten, um zu einem Umwandlungsfaktor zu gelangen, erfordert ein wiederholbares Ende des Entladepunktes. Ein Spannungsniveau von 10,5 Volt wird als ein Entladeende-Schwellenwert für den in den Fig. 13 und 14 gezeigten Test verwendet. Es ist festzustellen, dass alternative Entladeschwellenwerte, wie etwa eine vorbestimmte Amperestundenkapazität, benutzt werden können.

[0059] Während des Kapazitätstests der Batterien wird ein konsistentes Ruheintervall bereitgestellt, um zuzulassen, dass die Batterien einen Gleichgewichtszustand erzielen können, so dass ein passender Vergleich geschaffen wird. Der Ruhezeitraum ist beispielhaft als acht Stunden innerhalb der obigen Tests angegeben. Die Ruhezeiträume der zweiten Batterie werden mit einer Durchwärmungszeit vor dem Testen bei Nicht-Referenzbedingungen versehen, die es erlauben, dass die Batterie sich bei der Nicht-Referenztemperatur des Tests stabilisieren kann, und einem Durchwärmungsintervall, das nach dem Test beginnt, um die Batterie wieder zurück bei der Referenztemperatur zu stabilisieren.

[0060] Wenn in Erinnerung gerufen wird, dass die Entladekorrekturfaktoren die Kapazität unter Referenzbedingungen mit der Kapazität unter einem gegebenen Satz von Bedingungen in Beziehung bringen, ist festzustellen, dass bei der Betrachtung von Gleichung (15) für ein gegebenes Entladestromniveau die Entladekorrekturfaktoren η_d typischerweise größer sind als Eins für Tests, die bei niedriger Temperatur durchgeführt werden ($\Delta Q_r > \Delta Q_i$), und kleiner als Eins für die Tests, die bei hoher Temperatur durchgeführt werden, wobei die berechneten Werte im Bereich von 0,8 bis 1,5 liegen. Unter extremen Bedingungen, wie beispielsweise niedrige Temperatur und eine hohe Entladerrate, werden die Werte des Entladekorrekturfaktors η_d aufgrund der begrenzten Kapazität und Genauigkeit der Berechnung geringfügiger Amperestundenänderungen und der Annäherung von Q_n nicht aufgezeichnet.

[0061] Der allgemeine Trend für den Entladekorrekturfaktor η_d bei einer festen Temperatur wird als eine abnehmende Funktion von abnehmendem SOC gezeigt, wodurch die Materialumwandlung während des Entladeprozesses weniger effektiv für eine Batterie ist, die bei einem hohen SOC-Niveau startet, als für eine Batterie, die bei einem niedrigeren SOC-Niveau startet. Der beobachtete Trend erscheint vernünftig, da erwartet wird, dass eine Batterie, die bis zu einem hohen SOC aufgeladen oder vorbereitet wird, aufgrund der Anwesenheit von mehr nicht reagierter aktiver Masse und der Anwesenheit einer höheren Elektrolytkonzentration höhere kinetische Raten als eine Batterie mit einem niedrigen SOC besitzt. Diese höheren kinetischen Raten führen zu schnellerer Materialumwandlung und reduzieren somit die aktive Reaktionsoberfläche schnell, was zu einer physikalischen Blockade aufgrund eines erhöhten molekularen Volumens führt. Wenn außerdem die Betriebstemperatur reduziert wird, wird weiter die Rate der Elektrolytdiffusion aus der umgebenden Grenzfläche mit der Elektrolyt-Aktivmasse weiter reduziert. Es erscheint daher auch als vernünftig, dass der beobachtete

DE 101 58 029 A 1

Trend bei niedrigeren Temperaturen betonter wäre als bei hohen Temperaturen.

[0062] Bei niedrigen SOC-Niveaus der Batterie sind die kinetischen Raten relativ klein (d. h. aufgrund einer niedrigen Konzentration von reaktionsfähigen Materialien), und diese kinetischen Raten werden anscheinend mit der Rate der Elektrolytdiffusion vergleichbar. Aufgrund der langsameren kinetischen Raten und der Abwesenheit von nicht reagierter aktiver Masse wird eine Materialumwandlung forciert, so dass sie nicht nur an der Oberfläche sondern auch im Inneren der Elektroden fortschreitet. Da beispielsweise aktives Material aus dem Ladezustand in einen Entladezustand umgewandelt wird, PbO₂ und Pb in PbSO₄ umgewandelt wird, wobei ausreichend Zeit verfügbar ist, damit Elektrolyt aus den umgebenden Bereichen tief und gleichmäßiger in das Elektrodeninnere eindringen kann, was zu einer Zunahme der effektiven Materialumwandlung führt (d. h. wo der Entladewirkungsgrad sich den Referenzbedingungen nähert und der Korrekturfaktor η_d sich dadurch Eins nähert).

5

[0063] Eine geringfügige Reduktion der Werte des Enfladekorrekturfaktors η_d kann aufgrund der Batterietestprozedur aufgetreten sein. Es ist festzustellen, dass jede Batterie auf den angenäherten SOC vorbereitet wurde, indem ein vorbestimmtes Amperestundenkapazitätsmaß von einer vollständig aufgeladenen Batterie mit einer C₂₀-Rate weggenommen wurde, was künstlich die gleichmäßige Verteilung von reaktionsfähiger Fläche innerhalb der Elektroden fördern kann. Zusätzlich wurde zugelassen, dass die Batterie während des Testens bei niedriger Temperatur ein Gleichgewicht über ein ausgedehntes Intervall erreichen konnte, um den Elektrolytdurchtränkungsprozess zu unterstützen.

10

[0064] Das Ausmaß an Selbstdichten der Batterie, das während der Ruhezeiträume den stattfindet, kann zusätzlich eine Verschiebung in die Berechnung des Entladekorrekturfaktors η_d durch Reduzieren der gemessenen Werte von Q₂ und Q₄ eingeleitet haben, was dadurch zu einem verringerten Entladekorrekturfaktor η_d führen wird. Die Verschiebungswirkung kann ferner bei hohen Temperaturen und niedrigen Ladezustandsniveaus verschärft werden. Ein Batterieselbstentladungseffekt kann einzeln genommen jedoch nicht die Abnahme der berechneten Werte des Entladekorrekturfaktors η_d erklären, die von -18°C bis -29°C beobachtet wird.

15

[0065] Es ist festzustellen, dass diese unerwartete "Abnahme" des Entladekorrekturfaktors η_d hilft, die Akzentuierung innerhalb der vorliegenden Erfindung auf die Überwachung von inkrementellen Kapazitätsänderungen anstelle von Gesamtkapazitätsänderungen zu bestätigen. Anhand der Entladekurven von Fig. 7 ist festzustellen, dass die Entladeende-Bedingungen für 0°C, 25°C und 52°C sehr verschieden sind von den Ladeende-Bedingungen, die bei -18°C und -29°C zu finden sind. Während die Batterie auf hohen Temperaturen liegt, nimmt die Fähigkeit, Energie zu liefern, allmählich ab, da aktives Material langsam umgewandelt wird, wie es durch die glatten Spannungsprofile gezeigt ist, und die Materialumwandlung innerhalb der Elektrode ist im Wesentlichen stetig. Wenn jedoch die Testtemperatur auf Bereiche unter Null abnimmt, wird jedoch das Ende der Entladung abrupter, was typischerweise das Ergebnis davon ist, dass Elektrolyt auf einer Temperatur in der Nähe des Gefrierpunktes liegt, was den Transport von aktiven Ionen zur Grenzfläche begrenzt und dadurch die Leitfähigkeit reduziert. Der Ort der Materialumwandlung ist im Wesentlichen auf die Elektrolyt-Elektrodengrenzfläche begrenzt. Die Zusammenhänge werden weiter verkompliziert, da die Gefriertemperatur des Elektrolyts Änderungen ausgesetzt ist, wie sie durch eine Änderung der Elektrolytkonzentration gekennzeichnet sein kann.

20

[0066] Wie es festzustellen ist, liefern die Testergebnisse eine vernünftige Annäherung von inkrementellen Änderungen der Batteriekapazität (ΔQ_i) bei mittleren bis hohen Temperaturen. Die Korrekturfaktoren, die auf die Amperestundeninkremente (gemessenes Strom × Zeit-Inkrement) in der Beschreibung oben angewandt wurden, wurden im Allgemeinen so beschrieben, dass sie aus Nachschlagetabellen entnommen werden. Jedoch kann die Erfindung leicht praktisch ausgeführt werden, indem die Korrekturfaktoren in Echtzeit "im laufenden Betrieb" berechnet werden, und dann die Werte auf die Amperestundeninkremente angewendet werden. Der folgende Programmcode ist lediglich beispielhaft und nicht zur Beschränkung zum Ableiten von Korrekturfaktoren während entweder des Ladens oder des Entladens vorgesehen.

25

```

If Current > = 0 then
    # Charge
        iNorm = Current / NomCapacity
        (alfa0, alfa1) = funcChrgParameter (Temp)
        iCrit = Exp (alfa0 + alfa1 * LN(Soc))
        CorrFac = ((iCrit < iNorm) ? iCrit / iNorm : 1.0)
    Else
        # Discharge
            iNorm = Current / NomCapacity
            (gama0, gamal, gama2) = funcDschgParameter (Temp)
            CorrFac = gama0 + gamal * LN(iNorm) + gama2 * LN(Soc)
    Endif
    IF Current = 0 then CorrFac = 1.

```

30

35

40

55

60

65

DE 101 58 029 A 1

[0067] Das Verfahren des Lade/Entlade-Wirkungsgrads, das für die vorliegende Erfindung abgeleitet wurde, liefert eine mathematisch konsistente Korrelation, die die beschriebenen praktischen Verfahren zum Bestimmen des Batterie-SOC unter dynamischen Bedingungen ergibt. Die Korrekturfaktoren können, wie gezeigt, aus einer Tabelle heraus angewandt werden, die derart dimensioniert ist, dass sie zu den gemessenen Bedingungen passt, oder "im laufenden Betrieb", wie es oben beschrieben wurde, bestimmt werden. In jedem Fall kann eine genaue Ladezustandsabschätzung selbst für eine Batterie aufrechterhalten werden, die extrem dynamischen Lade- und Entladebedingungen ausgesetzt ist.

[0068] Es ist festzustellen, dass das Annähern der aktuellen Batteriekapazität als die Nennkapazität zu kumulativen Fehlern in Bezug auf die Batteriealterung führt. In Gleichung (17) wurde ein Wert für diesen Arbeitsspiel-Kapazitätsverlustfaktor eingeführt ($-1,529 \text{ Ah/Zyklus}$). Signifikante Abnahmen der nutzbaren Batteriekapazität können infolge eines Testens mit Tiefzyklen von beispielsweise Batterien, die für Kraftfahrzeuganlasser, Beleuchtung und Zündung verwendet werden (SLI-Batterien), auftreten, die typischerweise einen signifikanten Kapazitätsverlust pro Jahr zeigen. Es ist festzustellen, dass ein konstanter Wert für die Nennkapazität Q_n nach ein oder zwei Tiefentladungszyklen nicht länger vollständig genau ist. Um die Abnahme der Nennkapazität aufgrund eines zyklischen Durchlaufens von Tiefentladungen zu bestimmen, wurde ein Testen an einer Gruppe von dreißig neuen Batterien durchgeführt, deren Anfangskapazität unter den Referenzbedingungen einer Entladerate C_{20} und einer Temperatur von 25°C bestimmt wurde. Die C_{20} -Rate wird als die Amperestunden-Batteriekapazität dividiert durch zwanzig Stunden bestimmt: deshalb ergibt die Berechnung der C_{20} -Rate $69 \text{ Ah}/20 \text{ h} = 3,45 \text{ A}$ für das besondere Modell der benutzten Batterie. Fig. 15 zeigt ein Diagramm der dreißig Entladekurven, aus denen eine durchschnittliche Amperestundenkapazität von $63,37 \pm 1,23 \text{ Ah}$ bestimmt wurde. Bei der vorliegenden Testprozedur wurde jede Batterie dann nicht mehr als sechsmal Tiefentladungszyklen unterzogen, und es wurde eine abschließende Kapazitätstestprozedur mit niedriger Rate an einem Teil der Batterien durchgeführt. Das Durchschnittsniveau der Kapazitätsabnahme mit der zwanzigstündigen Entladerate wurde als annähernd $1,529 \text{ Ah}$ pro Tiefentladungszyklus bestimmt. Es wird leicht ersichtlich sein, dass Abschätzungen der Batterie-SOC verbessert werden können, indem das Ausmaß an Tiefentladungszyklen berücksichtigt wird, denen die Batterie ausgesetzt worden ist.

[0069] Es ist dementsprechend zu sehen, dass diese Erfindung ein Verfahren zum Abschätzen eines Batterieladezustandes bereitstellt, das in einer Vielfalt von elektrischen Energiemanagementsystemen benutzt werden kann. Es ist festzustellen, dass das Verfahren mit zahlreichen dem Fachmann ersichtlichen Abänderungen eingesetzt werden kann. Insbesondere ist festzustellen, dass spezifische Schwellenwerte und Intervalle oft festgelegt wurden, um einen Vergleichsstandard bereitzustellen, obwohl die Werte selbst sonst in einem weiten Bereich liegen könnten.

[0070] Wenn in der Beschreibung von einem Element im Singular die Rede ist, ist nicht beabsichtigt, dass "eines und nur ein einziges" gemeint ist, es sei denn, es ist explizit so festgestellt, sondern vielmehr "eines oder mehrere".

[0071] Zusammengefasst betrifft die Erfindung eine Vorrichtung 10 und Verfahren zum Bestimmen eines dynamischen Ladezustandes einer Batterie 12, die einem periodischen Laden und Entladen in einem System ausgesetzt ist. Korrekturfaktoren η werden für verschiedene Betriebsbedingungen von Strom, Temperatur und Ladezustand, die mit einem relativen Entlade- und Ladewirkungsgrad in Beziehung stehen, mit einem Referenzsatz von Bedingungen bestimmt. Gemäß den Bedingungen wird dann der Korrekturfaktor, der entweder in Echtzeit berechnet oder als ein gespeicherter Wert herausgesucht wird, dann periodisch auf die Lade- und Entladeströme der Batterie angewandt, um einen abgeschätzten Ladezustandswert SOC für die Batterie 12 in dem gegebenen System einzustellen.

40

45

50

55

60

65

DE 101 58 029 A 1

Tabelle 1

Abgeschätzter Ladekorrekturfaktor η_c als eine Funktion der Temperatur, des normierten Ladestromes und der Batterie-SOC

		Normierter Ladestrom φ_c				
Temp.	SOC	0,05	0,10	0,20	0,50	1,00
25°C	100%	0,031	0,015	0,008	0,003	0,002
	95%	0,096	0,048	0,024	0,010	0,005
	90%	0,320	0,160	0,080	0,032	0,016
	85%	1,000	0,570	0,285	0,114	0,057
	80%	1,000	1,000	1,000	0,439	0,220
	75%	1,000	1,000	1,000	1,000	0,924
50°C	100%	0,010	0,005	0,002	0,001	0,000
	95%	0,035	0,018	0,009	0,004	0,002
	90%	0,139	0,070	0,035	0,014	0,007
	85%	0,595	0,298	0,149	0,060	0,030
	80%	1,000	1,000	0,696	0,278	0,139
	75%	1,000	1,000	1,000	1,000	0,719
	70%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

5
10
15
20
25
30
35
40
45

50

55

60

65

DE 101 58 029 A 1

Tabelle 2

Physikalische Betriebszustände, die unterschiedliche Entladekorrekturfaktoren liefern

5 Bedingung	Grund
10 $\eta_d > 1,0$	SOC nimmt <i>schneller</i> ab als die Strom-Zeit-Integration aufgrund der niedrigen kinetischen Rate, weniger effektiver Masseübertragung und/oder schneller Volumenausdehnung ([Gleichung]), was zu einer physikalischen Blockade führt
15 $\eta_d = 1,0$	SOC wird direkt aus der Strom-Zeit-Integration bestimmt
20 $\eta_d < 1,0$	SOC nimmt <i>langsamer</i> ab als die Strom-Zeit-Integration, was aufgrund bestimmter Verbesserungen der Kinetik und/oder der Masse-Übertragungsraten möglich ist.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

DE 101 58 029 A 1

Tabelle 3A

Entladekorrekturfaktoren ($\leq 0^\circ\text{C}$)

Temp. °C	Entladestrom									
	3,45 A		10,0 A		25,0 A		35,0 A		45,0 A	
	SOC%	η_d	SOC%	η_d	SOC%	η_d	SOC%	η_d	SOC%	η_d
-29	88,8	1,343	87,9	1,441	88,6	1,416	87,6	1,297	88,3	1,414
	77,7	1,288	75,9	1,413	77,1	1,396	75,2	1,297	76,5	1,417
	66,5	1,135	63,8	1,258	65,7	1,311	62,9	1,188	64,8	1,329
	44,2	0,813	39,7	0,961	42,8	0,846	38,1	0,639	41,3	0,924
	21,9	0,605	15,6	-	19,9	-	13,3	-	17,8	-
-18	88,8	1,321	87,9	1,533	88,6	1,645	87,6	1,499	88,3	1,660
	77,7	1,304	75,9	1,424	77,1	1,614	75,2	1,385	76,5	1,594
	66,5	1,279	63,8	1,396	65,7	1,594	62,9	1,377	64,8	1,592
	44,2	1,291	39,7	1,651	42,8	2,017	38,1	1,698	41,3	2,161
	21,9	1,408	15,6	-	19,9	-	13,3	-	17,8	-
0	88,8	1,055	87,9	1,225	88,6	1,283	87,6	1,337	88,3	1,387
	77,7	1,047	75,9	1,160	77,1	1,210	75,2	1,223	76,5	1,265
	66,5	1,017	63,8	1,120	65,7	1,185	62,9	1,140	64,8	1,206
	44,2	0,947	39,7	1,035	42,8	1,050	38,1	0,918	41,3	1,058
	21,9	0,868	15,6	0,600	19,9	0,447	13,3	-	17,8	-

5
10
15
20
25
30
35
40
4550
55
60
65

DE 101 58 029 A 1

Tabelle 3B

Entladekorrekturfaktoren (> 0°C)

Temp. °C	Entladestrom									
	3,45 A		10,0 A		25,0 A		35,0 A		45,0 A	
	SOC%	η_d	SOC%	η_d	SOC%	η_d	SOC%	η_d	SOC%	η_d
25	99,3	1,000	88,8	1,023	88,8	1,068	88,6	1,083	88,6	1,064
	91,0	1,000	77,7	1,040	77,7	1,119	77,1	1,091	77,1	1,108
	78,4	1,000	66,5	1,032	66,5	1,034	65,7	1,096	65,7	1,416
	45,6	1,000	44,2	1,013	44,2	1,091	42,8	1,086	42,8	0,914
	28,1	1,000	21,9	1,056	21,9	1,073	19,9	0,969	19,9	-
52	88,8	0,880	87,9	0,946	88,6	0,958	87,6	0,819	88,3	1,009
	77,7	0,861	75,9	0,858	77,1	0,927	75,2	0,757	76,5	0,943
	66,5	0,856	63,8	0,934	65,7	0,951	62,9	0,739	64,8	0,998
	44,2	0,803	39,7	0,754	42,8	0,829	38,1	0,584	41,3	0,812
	21,9	0,731	15,6	0,953	19,9	0,915	13,3	0,162	17,8	-

35

Tabelle 4

Peukert-Regressionskoeffizienten

Temp °C	γ_0	γ_1	γ_2
-29	0,2244	0,3507	-0,0753
-18	0,2707	0,3811	-0,1043
0	0,4524	0,4410	-0,1450
25	0,6365	0,7337	-0,1235
52	0,8281	0,7398	-0,0920

55

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen des dynamischen Ladezustandes einer Batterie (12), die einem periodischen Laden und Entladen ausgesetzt ist, umfassend, dass:
 - (a) empirisch ein Korrekturfaktor η unter verschiedenen Betriebsbedingungen abgeleitet wird, die den Wirkungsgrad einer Stromübertragung mit der Batterie (12) beschreiben,
 - (b) die Ladeströme und Entladeströme gemessen werden, denen die Batterie (12) ausgesetzt wird,
 - (c) ein Zeitintervall festgelegt wird, das mit den Lade- und Entladeströmen in Beziehung steht, so dass die zugehörigen Amperestunden berechnet werden können, und
 - (d) ein dynamischer Ladezustandswert für die Batterie (12) berechnet wird, indem der Korrekturfaktor η auf jedes Amperestundeninkrement inkrementell angewendet wird, um einen vorhandenen Ladezustandswert zu aktualisieren.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Korrekturfaktor η gemäß Betriebsbedingungen bestimmt wird, die die Temperatur, das Stromniveau und den Ladezustand umfassen.

DE 101 58 029 A 1

3. Verfahren zum Bestimmen eines dynamischen Ladezustandes in einer Batterie (12), die einem periodischen Laden und Entladen ausgesetzt ist, umfassend, dass:

- ein Satz von Parametern, aus dem ein Korrekturfaktor η für die Batterie (12) berechnet werden kann, unter Betriebsbedingungen auf der Grundlage von Daten bestimmt wird, die aus einem Testen eines Satzes von Referenzbatterien gesammelt werden, wobei der Korrekturfaktor η das Niveau einer effektiven Stromübertragung mit der Batterie unter einem gegebenen Satz von Bedingungen ausdrückt;
- ein Korrekturfaktor η für eine gegebene Betriebsbedingung aus dem Satz von Parametern berechnet wird, und
- der Korrekturfaktor η auf die Berechnung von $\Delta SOC = (\eta \times i \times \Delta t)/Q_n$ angewandt wird, um den Ladezustand (SOC) unter den gegenwärtigen Betriebsbedingungen zu aktualisieren, so dass der Korrekturfaktor η dadurch in Ströme zerlegt wird, die an die Batterie angelegt werden und von dieser empfangen werden, welche über eine Zeitspanne Δt in Relation zur Nennbatteriekapazität Q_n verfolgt werden, um einen Ladezustandwert für die Batterie (12) zu liefern.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Betriebsbedingungen der Batterie (12) die Betriebstemperatur, den Stromfluss und den Ladezustand umfassen.

5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung des Korrekturfaktors η in Echtzeit gemäß den Betriebsbedingungen auf der Grundlage eines Satzes von Parametern, die für ein späteres Heraussuchen gespeichert worden sind, durchgeführt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung des Korrekturfaktors η während des Ladens auf der Grundlage von gespeicherten Eigenschaftsparametern für die Batterie (12) gemäß einem Verfahren durchgeführt wird, das umfasst, dass:

- der Ladestrom bezüglich der Batteriekapazität normiert wird,
- gespeicherte Parameter α_0 und α_1 bei der gegenwärtigen Temperatur nachgeschlagen werden,
- der kritische Punkt $\varphi_{kritisch} = e^{\alpha_0} + \alpha_1 \ln \phi$ berechnet wird, und
- ein Korrekturfaktor $\eta = \varphi_{kritisch}/\varphi_{normal}$ berechnet wird, wenn der Wert des Ladestroms den kritischen Strom für die Bedingungen übersteigt und sonst ein Korrekturfaktor von Eins verwendet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung des Korrekturfaktors η während des Entladens auf der Grundlage von gespeicherten Eigenschaftsparametern für die Batterie (12) gemäß dem Verfahren durchgeführt wird, das umfasst, dass:

- der Endladestrom bezüglich der Batteriekapazität normiert wird,
- gespeicherte Parameter γ_0 , γ_1 , γ_2 bei der gegenwärtigen Temperatur nachgeschlagen werden, und
- ein Korrekturfaktor $\eta = \gamma_0 + \gamma_1 \ln \phi - \gamma_2 \ln \varphi$ berechnet wird, wobei ϕ der Entladestrom und φ der gegenwärtige Ladezustand ist.

8. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung von Parametern und die Berechnung des Korrekturfaktors η nicht in Echtzeit durchgeführt werden, so dass mehrere Korrekturfaktoren η gemäß Betriebsbedingungen berechnet und gespeichert werden, die dann zur Anwendung auf die SOC-Berechnung unter tatsächlichen Bedingungen in Echtzeit herausgesucht werden.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung von Parametern und die Berechnung eines Korrekturfaktors η zur Verwendung während des Batterieladens für eine gegebene Betriebsbedingung gemäß dem Verfahren durchgeführt werden, das umfasst, dass:

- ein Referenzsatz von Batterien, deren Eigenschaften ähnlich wie die der Batterie (12) sind, mit einem vorbestimmten konstanten ersten Entladestrom bis zu einem ersten Ladezustandsniveau entladen wird,
- die Referenzbatterien mit einem konstanten Ladestrom geladen werden und Ladespannungsprofile in Bezug auf den abgeschätzten Batterieladezustand aufgezeichnet werden,
- der Ladezustand ϕ bestimmt wird, für den die Überladebeginn-Bedingung auftritt,
- empirische Koeffizienten α_0 und α_1 für die Gleichung $\varphi_{kritisch} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \phi$ bei einer gegebenen Temperatur bestimmt werden, wobei $\varphi_{kritisch}$ der normierte kritische Strom ist,
- der kritische Punkt $\varphi_{kritisch} = e^{\alpha_0} + \alpha_1 \ln \phi$ berechnet wird, und
- ein Korrekturfaktor $\eta = \varphi_{kritisch}/\varphi_{normal}$ berechnet wird, wenn der Wert des Ladestroms den kritischen Strom für die Bedingungen übersteigt, und sonst ein Korrekturfaktor von Eins verwendet wird, wobei der Korrekturfaktor η gemäß einer Betriebsbedingung zur Anwendung in Echtzeit gespeichert wird, um den Ladezustandswert für die Batterie (12) zu aktualisieren.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Laden nach einem Ruheintervall durchgeführt wird, so dass die Batterien einen angestrebten Gleichgewichtszustand erreichen können.

11. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Überladebeginn aus einem Wendepunkt in einem Spannungsprofil als eine Funktion des Ladezustandes berechnet wird.

12. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass bestimmt wird, dass der Überladebeginn auftritt, wenn ein überwachtes Niveau einer Gasströmungsrate eine vorbestimmte Schwellenbedingung übersteigt.

13. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung von Parametern und die Berechnung eines Korrekturfaktors η zur Verwendung während des Entladens der Batterie für eine gegebene Betriebsbedingung gemäß dem Verfahren durchgeführt werden, das umfasst, dass:

- eine Referenzbatterie, die auf einer ersten Temperatur (Referenz) gehalten wird, mit einem vorbestimmten ersten Entladestrom entladen wird, bis ein vorbestimmtes erstes Ladezustandsniveau (SOC-Niveau) erzielt ist, und die weggenommenen Amperestunden als Q_1 aufgezeichnet werden.
- eine abgeschätzte Restkapazität $Q_2 = Q_n - Q_1$ berechnet wird, so dass die Kapazität Q_1 von der festgestellten Nennbatteriekapazität Q_n subtrahiert wird,

DE 101 58 029 A 1

(c) die Referenzbatterie in einem ersten Ruhezeitraum mit einer ausreichenden Dauer ruhen gelassen wird, um einen angestrebten Gleichgewichtszustand zu erzielen,
5 (d) die Referenzbatterie mit einem vorbestimmten zweiten Teststrom entladen wird, bis die gemessene Batteriespannung eine vorbestimmte Endentladespannung V_f erreicht, und die dadurch weggenommene Amperestundenkapazität als Q_3 aufgezeichnet wird,
(e) die Referenzbatterie in einem zweiten Ruhezeitraum über eine ausreichende Dauer ruhen gelassen wird, um einen angestrebten Gleichgewichtszustand zu erzielen,
10 (f) die Referenzbatterie mit dem vorbestimmten ersten Entladestrom hinunter bis zu einer vorbestimmten Endentladespannung V_f entladen wird und die dadurch weggenommene Amperestundenkapazität als Q_4 aufgezeichnet wird, und
(g) eine Entladekorrekturfaktorschätzung $\eta_d \cong (Q_2-Q_4)/Q_3$ berechnet wird, so dass (Q_2-Q_4) die erwartete Kapazität darstellt, die unter den Referenzbedingungen verfügbar ist, wobei der Korrekturfaktor η gemäß Betriebsbedingungen zur Anwendung in Echtzeit gespeichert wird, um den Ladezustandwert für die Batterie (12) zu aktualisieren.

15 14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Entladestrom auf die C_{20} -Entladerate für die Batterie festgelegt wird.

15. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Korrekturfaktor η bei einer vorbestimmten zweiten Temperatur bestimmt wird, so dass der Test ferner umfasst, dass die Batterie in dem ersten Ruhezeitraum über eine zusätzliche Zeitdauer bei der zweiten Temperatur ruhen gelassen wird, und dass das Entladen des Schrittes
20 (d) bei der zweiten Temperatur durchgeführt wird, wonach bei Schritt (e) die Batterie auf die erste Temperatur zurückgeführt wird und über eine ausreichende Zeitdauer ruhen gelassen wird, um einen angestrebten Temperaturgleichgewichtszustand zu erzielen, und dass der Korrekturfaktor η bei zusätzlichen vorbestimmten Temperaturen bestimmt werden kann.

25 16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass, wenn die vorbestimmte zweite Temperatur kleiner als 0°C ist, dann die Länge des Ruhezeitraums im Vergleich mit demjenigen, der bei der ersten Temperatur (Referenz) verwendet wird, annähernd verdoppelt wird.

17. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass, während eines Teils des Ruheintervalls eine kleine Stromlast mit der Batterie verbunden wird, die eine parasitäre Belastung der Batterie unter Betriebsbedingungen simuliert.

30 18. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass eine Nennbatteriekapazität für die Batterie berechnet wird, die von der Abnahme der Batteriekapazität infolge eines Durchlaufens von Tiefentladungszyklen abhängt.

19. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung von Parametern und die Berechnung eines Korrekturfaktors η zur Verwendung während des Entladens der Batterie für eine gegebene Betriebsbedingung gemäß einem Verfahren durchgeführt werden, das umfasst, dass:

35 (a) eine erste Batterie, die auf einer ersten Temperatur (Referenz) gehalten wird, mit einem vorbestimmten ersten Entladestrom entladen wird, bis ein vorbestimmter erster Batteriezustand erreicht ist, und die weggenommenen Amperestunden als Q_1 aufgezeichnet werden,
(b) zusätzliche Kapazität aus der ersten Batterie entladen wird, bis ein Entladeende-Schwellenwert erreicht ist, während die weggenommenen Amperestunden als Q_2 aufgezeichnet werden,
40 (c) eine zweite Batterie, die auf einer ersten Temperatur (Referenz) gehalten wird, mit einem vorbestimmten ersten Entladestrom entladen wird, bis der vorbestimmte erste Batteriezustand erreicht ist,
(d) die zweite Batterie unter einer Betriebsbedingung einer Temperatur und einer Entladerate entladen wird, während die weggenommenen Amperestunden als Q_3 aufgezeichnet werden,
(e) zusätzliche Kapazität aus der zweiten Batterie entladen wird, bis der Entladeende-Schwellenwert erreicht ist, während die weggenommenen Amperestunden als Q_4 aufgezeichnet werden, und
45 (f) ein Entladekorrekturfaktor $\eta_d = (Q_2-Q_4)/Q_3$ berechnet wird, der gemäß Betriebsbedingungen gespeichert wird.

50 20. Vorrichtung (10) zum Bestimmen eines dynamischen Ladezustandes einer Batterie (12), die einem periodischen Laden und Entladen ausgesetzt ist, umfassend:

(a) ein Mittel zum empirischen Ableiten eines Korrekturfaktors η unter verschiedenen Betriebsbedingungen, die den Wirkungsgrad einer Stromübertragung mit der Batterie (12) beschreiben,
(b) ein Mittel zum Messen der Ladeströme und Entladeströme, denen die Batterie (12) ausgesetzt ist,
(c) ein Mittel zum Festlegen eines Zeitintervalls, das mit den Lade- und Entladeströmen in Beziehung steht, so dass die zugehörigen Amperestunden berechnet werden können, und
55 (d) ein Mittel zum Berechnen eines Wertes für den dynamischen Ladezustand für die Batterie (12), indem der Korrekturfaktor η inkrementell auf jedes Amperestundeninkrement angewandt wird, um einen vorhandenen Ladezustandswert zu aktualisieren.

21. Vorrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass der Korrekturfaktor η gemäß Betriebsbedingungen bestimmt wird, die die Temperatur, das Stromniveau und den Ladezustand umfassen.

60 22. Vorrichtung zum Bestimmen eines dynamischen Ladezustandes in einer Batterie (12), die einem periodischen Laden und Entladen ausgesetzt ist, umfassend:

(a) ein Mittel zum Bestimmen eines Satzes von Parametern, aus dem ein Korrekturfaktor η für die Batterie (12) berechnet werden kann, unter Betriebsbedingungen auf der Grundlage von Daten, die aus einem Testen eines Satzes von Referenzbatterien gesammelt werden, wobei der Korrekturfaktor η das Niveau einer effektiven Stromübertragung mit der Batterie unter einem gegebenen Satz von Bedingungen ausdrückt,
65 (b) ein Mittel zum Berechnen eines Korrekturfaktors η für eine gegebene Betriebsbedingung aus dem Satz von Parametern, und
(c) ein Mittel zum Anwenden des Korrekturfaktors η auf die Berechnung von $\Delta\text{SOC} = (\eta \times i \times \Delta t)/Q_n$, um den

DE 101 58 029 A 1

Ladezustand (SOC) unter den gegenwärtigen Betriebsbedingungen zu aktualisieren, so dass der Korrekturfaktor η dadurch in Ströme i zerlegt wird, die an die Batterie angelegt und von dieser empfangen werden, welche über eine Zeitspanne Δ_t in Relation zur Nennbatteriekapazität Q_n verfolgt werden, um einen Ladezustandswert für die Batterie (12) zu liefern.

23. Vorrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Betriebsbedingungen der Batterie (12) die Betriebstemperatur, den Stromfluss und den Ladezustand umfassen. 5

24. Vorrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung des Korrekturfaktors η in Echtzeit gemäß den Betriebsbedingungen auf der Grundlage eines Satzes von Parametern durchgeführt wird, die zum späteren Heraussuchen gespeichert worden sind. 10

25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung des Korrekturfaktors η während des Ladens auf der Grundlage von gespeicherten Eigenschaftsparametern für die Batterie (12) gemäß einem Verfahren durchgeführt wird, das umfasst, dass:

- (a) der Ladestrom bezüglich der Batteriekapazität normiert wird,
- (b) gespeicherte Parameter α_0 und α_1 bei der gegenwärtigen Temperatur nachgeschlagen werden,
- (c) der kritische Punkt $\varphi_{kritisch} = e^{\alpha_0}$ 15
+ $\alpha_1 \ln \phi$ berechnet wird; und
- (d) ein Korrekturfaktor $\eta = \varphi_{kritisch}/\varphi_{normal}$ berechnet wird, wenn der Wert des Ladestroms den kritischen Strom für die Bedingungen übersteigt, und sonst ein Korrekturfaktor von Eins verwendet wird.

26. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung des Korrekturfaktors η während des Entladens auf der Grundlage von gespeicherten Eigenschaftsparametern für die Batterie (12) gemäß dem Verfahren durchgeführt wird, das umfasst, dass: 20

- (a) der Entladestrom bezüglich der Batteriekapazität normiert wird,
- (b) gespeicherte Parameter γ_0 , γ_1 , γ_2 bei der gegenwärtigen Temperatur nachgeschlagen werden, und
- (c) ein Korrekturfaktor $\eta = \gamma_0 + \gamma_1 \ln \phi + \gamma_2 \ln \varphi$ berechnet wird, wobei ϕ der Entladestrom und φ der gegenwärtige Ladezustand ist. 25

27. Vorrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung von Parametern und die Berechnung des Korrekturfaktors η nicht in Echtzeit durchgeführt werden, so dass mehrere Korrekturfaktoren η gemäß Betriebsbedingungen berechnet und gespeichert werden, die dann zur Anwendung auf die SOC-Berechnung unter tatsächlichen Bedingungen in Echtzeit herausgesucht werden. 30

28. Vorrichtung nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung von Parametern und die Berechnung eines Korrekturfaktors η zur Verwendung während des Ladens der Batterie für eine gegebene Betriebsbedingung gemäß dem Verfahren durchgeführt werden, dass:

- (a) ein Referenzsatz von Batterien, deren Eigenschaften ähnlich sind wie die der Batterie (12), mit einem vorbestimten konstanten ersten Entladestrom bis zu einem ersten Ladezustandsniveau entladen wird,
- (b) die Referenzbatterien mit einem konstanten Ladestrom geladen werden, und Ladespannungsprofile in Bezug auf einen abgeschätzten Batterieladezustand aufgezeichnet werden, 35
- (c) der Ladezustand ϕ bestimmt wird, für den die Überladebeginn-Bedingung auftritt,
- (d) empirische Koeffizienten α_0 und α_1 für die Gleichung $\ln \varphi_{kritisch} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \phi$ bei einer gegebenen Temperatur bestimmt werden, wobei $\varphi_{kritisch}$ der normierte kritische Strom ist,
- (e) der kritische Punkt $\varphi_{kritisch} e^{\alpha_0}$ 40
+ $\alpha_1 \ln \phi$ berechnet wird; und
- (f) ein Korrekturfaktor $\eta = \varphi_{kritisch}/\varphi_{normal}$ berechnet wird, wenn der Wert des Ladestroms den kritischen Strom für die Bedingungen übersteigt, und sonst ein Korrekturfaktor von Eins verwendet wird, wobei der Korrekturfaktor η gemäß einer Betriebsbedingung zur Anwendung in Echtzeit gespeichert wird, um den Ladezustandswert für die Batterie (12) zu aktualisieren. 45

29. Vorrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, dass das Laden nach einem Ruheintervall durchgeführt wird, so dass die Batterien einen angestrebten Gleichgewichtszustand erreichen können. 50

30. Vorrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, dass der Überladebeginn aus einem Wendepunkt in einem Spannungsprofil als eine Funktion des Ladezustands berechnet wird.

31. Vorrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, dass bestimmt wird, dass der Überladebeginn auftritt, wenn ein überwachtes Niveau einer Gasströmungsrate eine vorbestimmte Schwellenbedingung übersteigt. 55

32. Vorrichtung nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung von Parametern und die Berechnung eines Korrekturfaktors η zur Verwendung während des Entladens der Batterie für eine gegebene Betriebsbedingung gemäß dem Verfahren durchgeführt werden, dass:

- (a) eine Referenzbatterie, die auf einer ersten Temperatur (Referenz) gehalten wird, mit einem vorbestimmen ersten Entladestrom entladen wird, bis ein vorbestimmtes erstes Ladezustandsniveau (SOC-Niveau) erzielt ist, und die weggenommenen Amperestunden als Q_1 aufgezeichnet werden;
- (b) eine abgeschätzte Restkapazität $Q_2 = Q_n - Q_1$ berechnet wird, so dass die Kapazität Q_1 von der festgestellten Nennbatteriekapazität Q_n subtrahiert wird,
- (c) die Referenzbatterie in einem ersten Ruhezeitraum von ausreichender Dauer ruhen gelassen wird, um einen angestrebten Gleichgewichtszustand zu erreichen, 60
- (d) die Referenzbatterie mit einem vorbestimmten zweiten Teststrom entladen wird, bis die gemessene Batteriespannung eine vorbestimmte Endentladespannung V_f erreicht, und die dadurch weggenommene Amperestundenkapazität als Q_3 aufgezeichnet wird,
- (e) die Referenzbatterie in einem zweiten Ruhezeitraum von ausreichender Dauer ruhen gelassen wird, um einen angestrebten Gleichgewichtszustand zu erreichen, 65
- (f) die Referenzbatterie mit dem vorbestimmten ersten Entladestrom hinunter bis zu der vorbestimmten Endentladespannung V_f entladen wird, und die dadurch weggenommene Amperestundenkapazität als Q_4 aufge-

DE 101 58 029 A 1

zeichnet wird, und

(g) eine Entladekorrekturfaktorabschätzung $\eta_d \cong (Q_2-Q_4)/Q_3$ berechnet wird, so dass (Q_2-Q_4) die erwartete Kapazität darstellt, die unter den Referenzbedingungen verfügbar ist, wobei der Korrekturfaktor η gemäß Betriebsbedingungen zur Anwendung in Echtzeit gespeichert wird, um den Ladezustandwert für die Batterie (12) zu aktualisieren.

5 33. Vorrichtung nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Entladestrom auf die C_{20} -Entladerate für die Batterie festgelegt wird.

10 34. Vorrichtung nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, dass der Korrekturfaktor η bei einer vorbestimmten zweiten Temperatur bestimmt wird, so dass der Test ferner umfasst, dass die Batterie in dem ersten Ruhezeitraum für eine zusätzliche Zeitdauer bei der zweiten Temperatur ruhen gelassen wird, und dass das Entladen von Schritt (d) bei der zweiten Temperatur durchgeführt wird, wonach bei Schritt (e) die Batterie auf die erste Temperatur zurückgeführt wird und für eine ausreichende Zeitdauer gelassen wird, um einen angestrebten Temperaturgleichgewichtszustand zu erreichen, und dass der Korrekturfaktor η bei zusätzlichen vorbestimmten Temperaturen bestimmt werden kann.

15 35. Vorrichtung nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, dass, wenn die vorbestimmte zweite Temperatur kleiner als 0°C ist, dann die Länge des Ruhezeitraums im Vergleich mit demjenigen, der bei der ersten Temperatur (Referenz) verwendet wird, annähernd verdoppelt ist.

20 36. Vorrichtung nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, dass, während eines Teils des Ruheintervalls eine kleine Stromlast mit der Batterie verbunden ist, die eine parasitäre Belastung der Batterie unter Betriebsbedingungen simuliert.

25 37. Vorrichtung nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, dass diese eine Nennbatteriekapazität für die Batterie berechnet, die von der Abnahme der Batteriekapazität infolge eines Durchlaufens von Tiefentladungszyklen abhängt.

30 38. Vorrichtung nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung von Parametern und die Berechnung eines Korrekturfaktors η zur Verwendung während des Entladens der Batterie für eine gegebene Betriebsbedingung gemäß einem Verfahren durchgeführt werden, das umfasst, dass:

(a) eine erste Batterie, die auf einer ersten Temperatur (Referenz) gehalten wird, mit einem vorbestimmten ersten Entladestrom entladen wird, bis ein vorbestimmter erster Batteriezustand erreicht ist, und die weggenommenen Amperestunden als Q_1 aufgezeichnet werden,

35 (b) zusätzliche Kapazität aus der ersten Batterie entladen wird, bis ein Entladende-Schwellenwert erreicht ist, während die weggenommenen Amperestunden als Q_2 aufgezeichnet werden,

(c) eine zweite Batterie, die auf einer ersten Temperatur (Referenz) gehalten wird, mit einem vorbestimmten ersten Entladestrom entladen wird, bis der vorbestimmte erste Batteriezustand erreicht ist,

(d) die zweite Batterie unter einer Betriebsbedingung einer Temperatur und einer Entladerate entladen wird, während die weggenommenen Amperestunden als Q_3 aufgezeichnet werden,

40 (e) zusätzliche Kapazität aus der zweiten Batterie entladen wird, bis der Entladende-Schwellenwert erreicht ist, während die weggenommenen Amperestunden als Q_4 aufgezeichnet werden, und

(f) ein Entladekorrekturfaktor $\eta_d \cong (Q_2-Q_4)/Q_3$ berechnet wird, der gemäß Betriebsbedingungen gespeichert wird.

45

Hierzu 15 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65

- Leerseite -

Fig. 1.

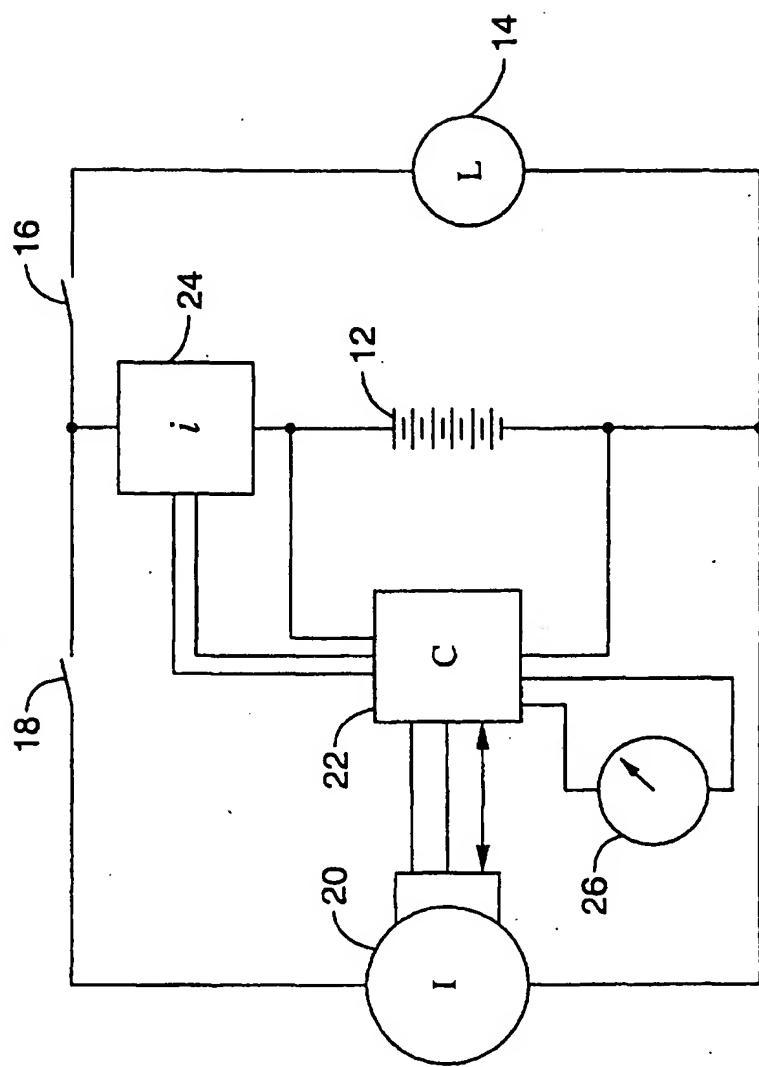
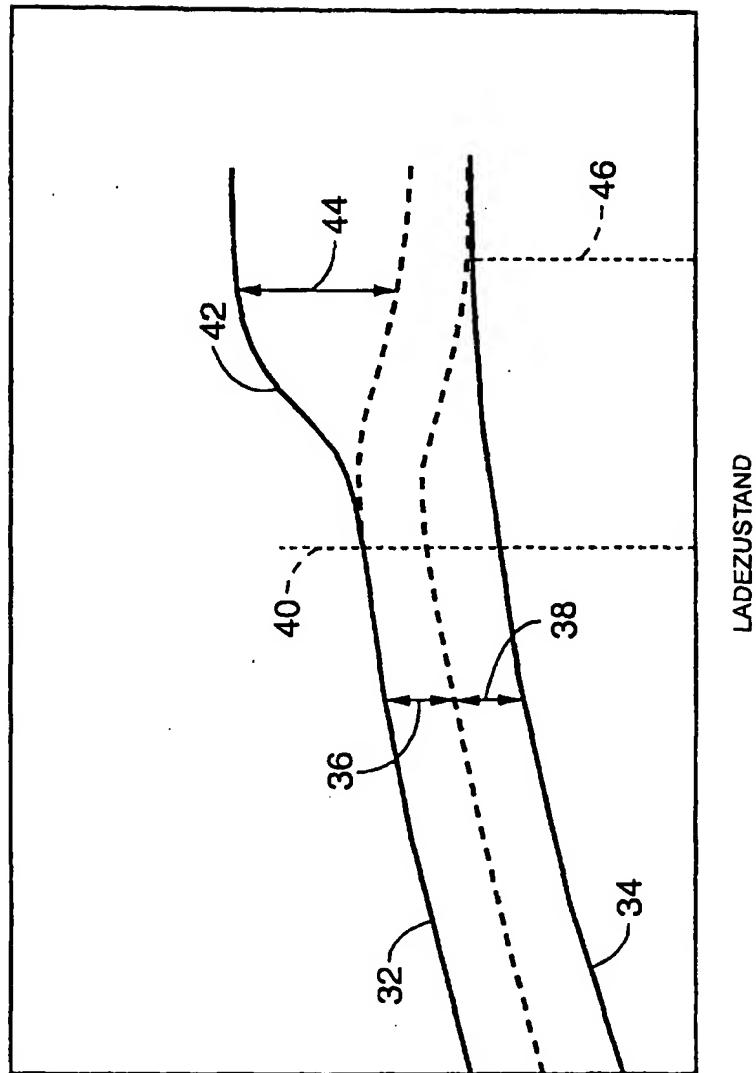


Fig. 2.



30 ↗

SPANNUNG

Fig.3.

50

BATTERIESPANNUNG

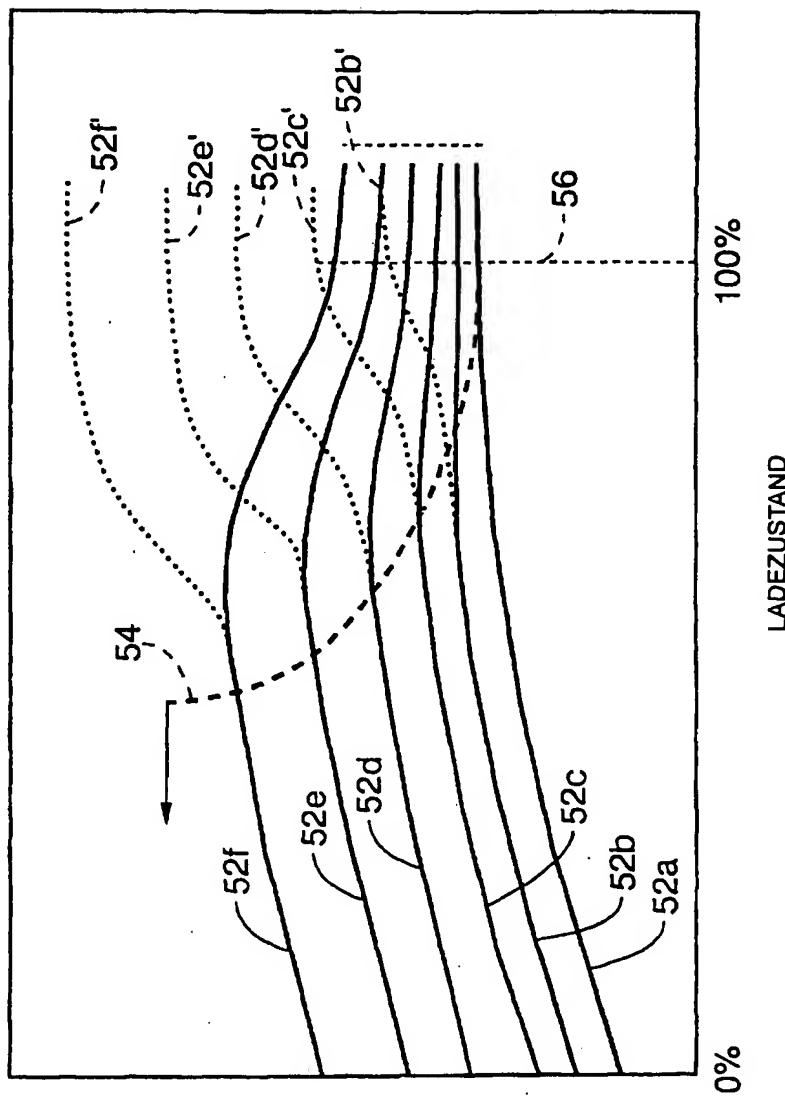


Fig. 4.

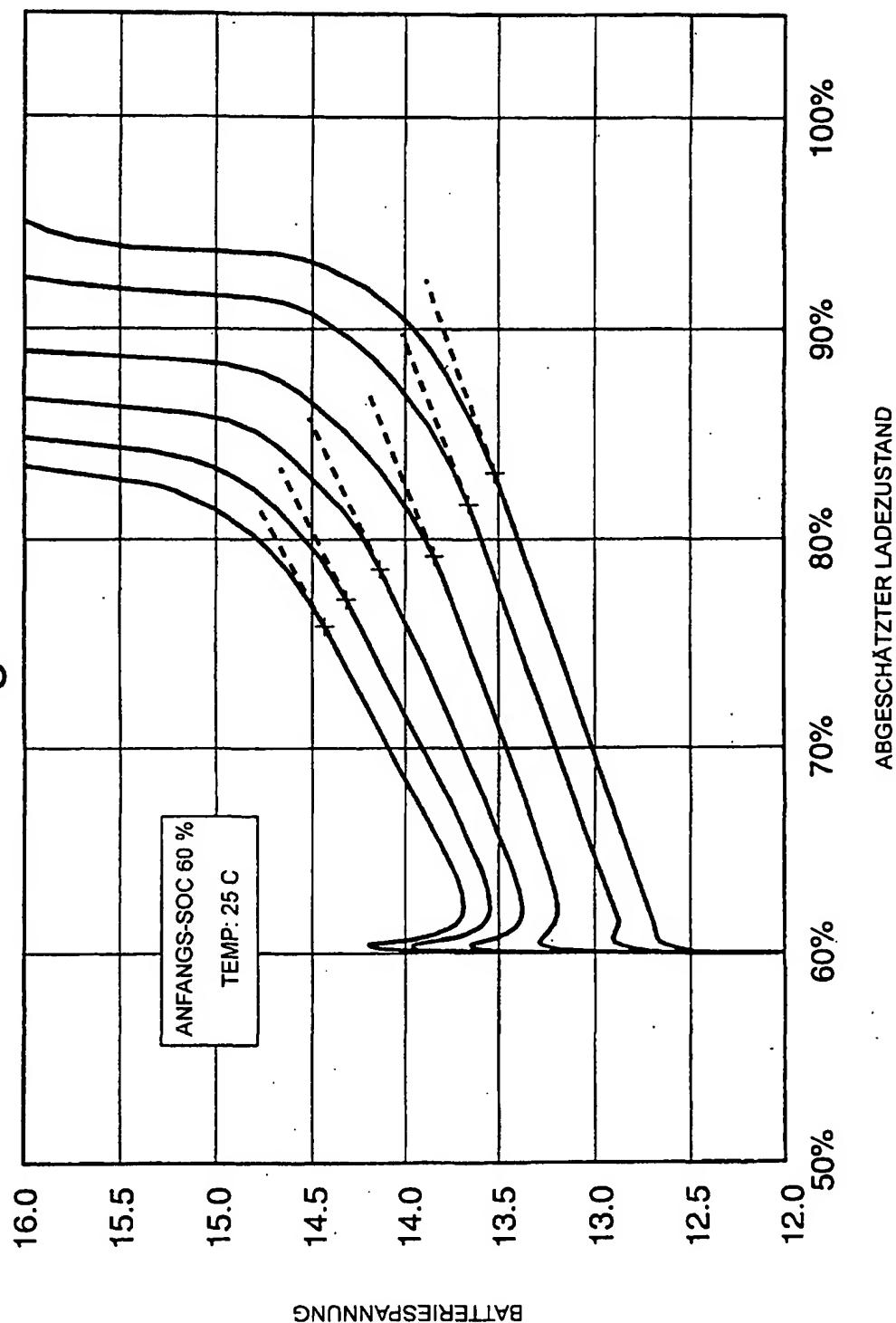


Fig.5.

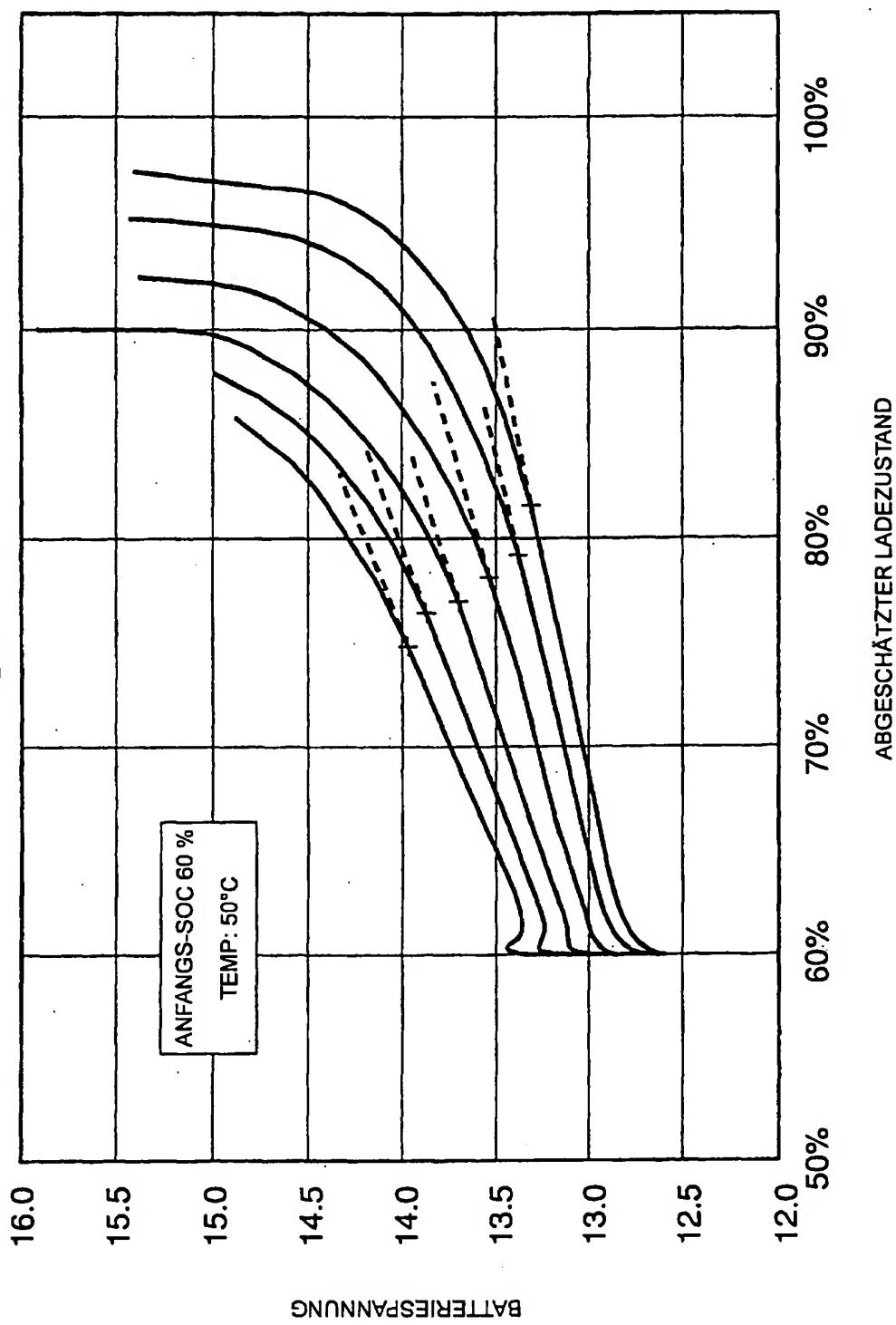


Fig. 6.

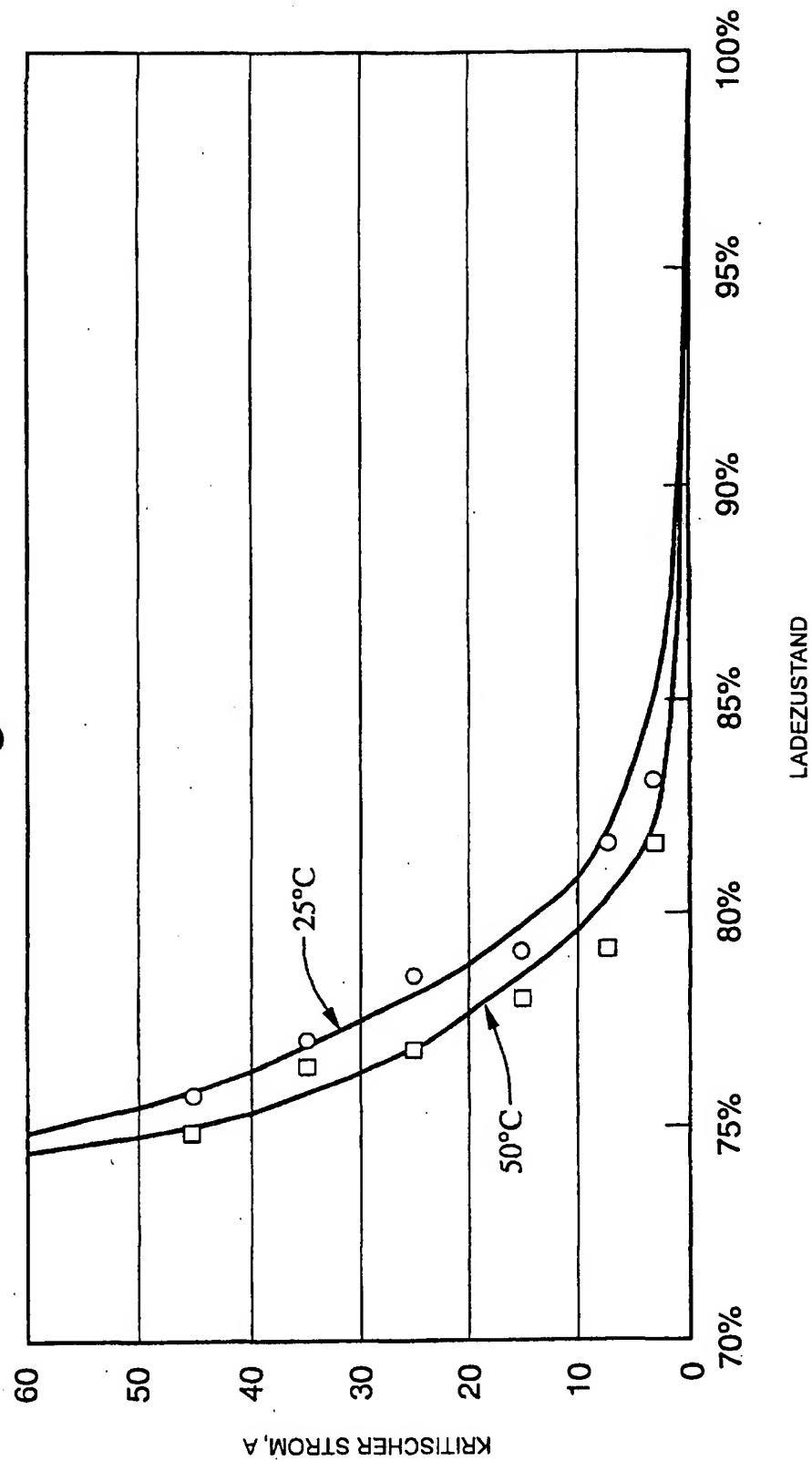


Fig. 7.

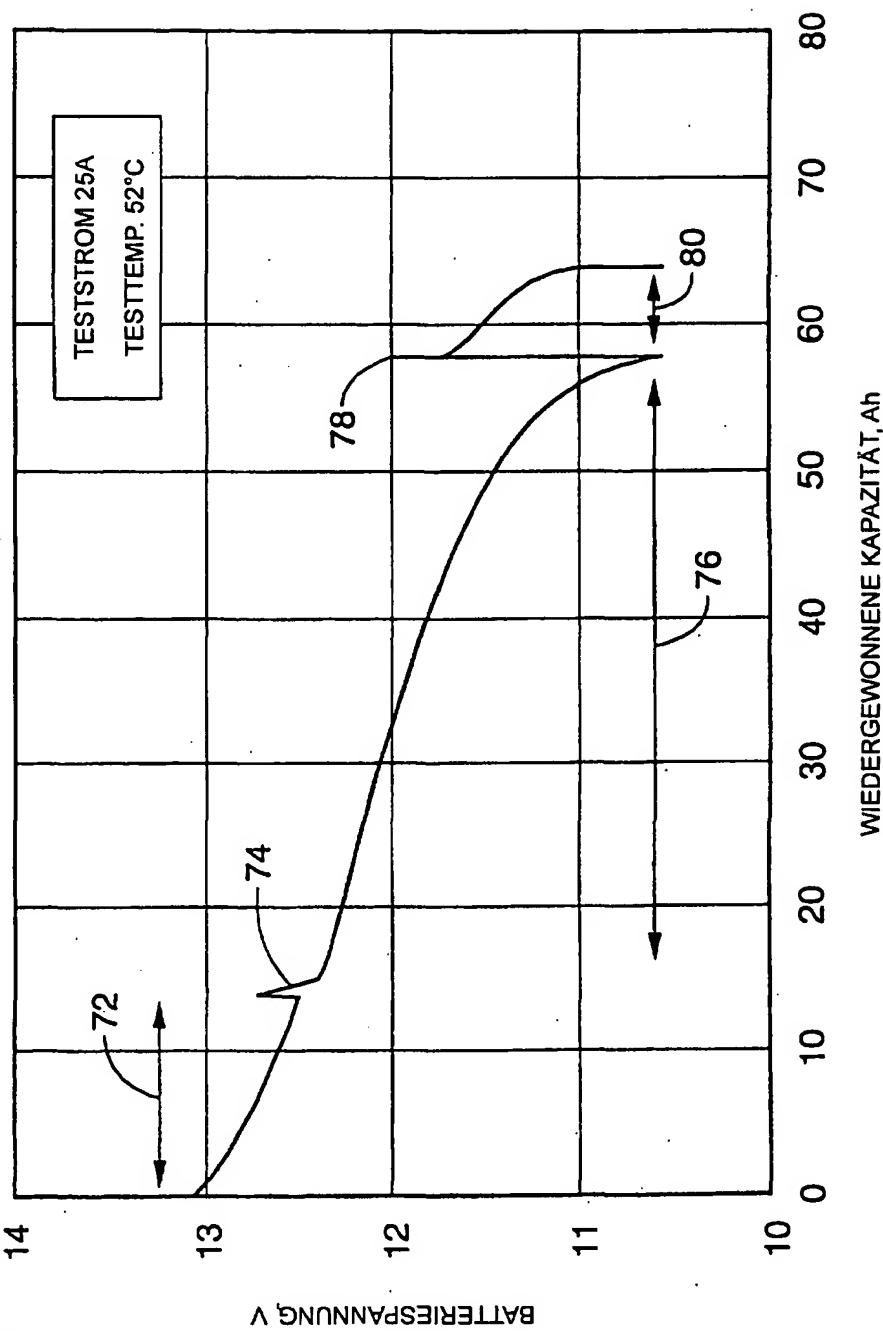


Fig.8.

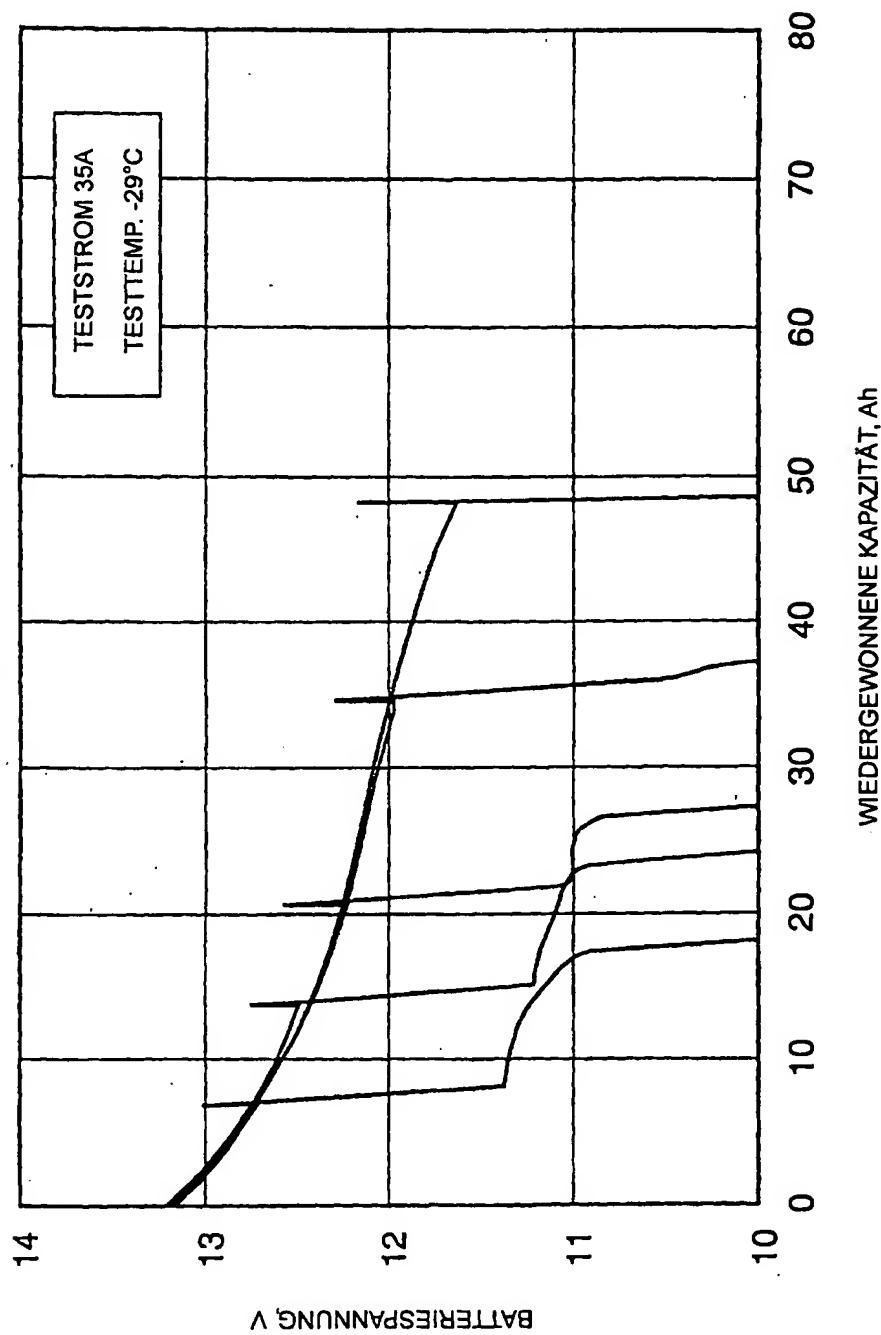


Fig. 9.

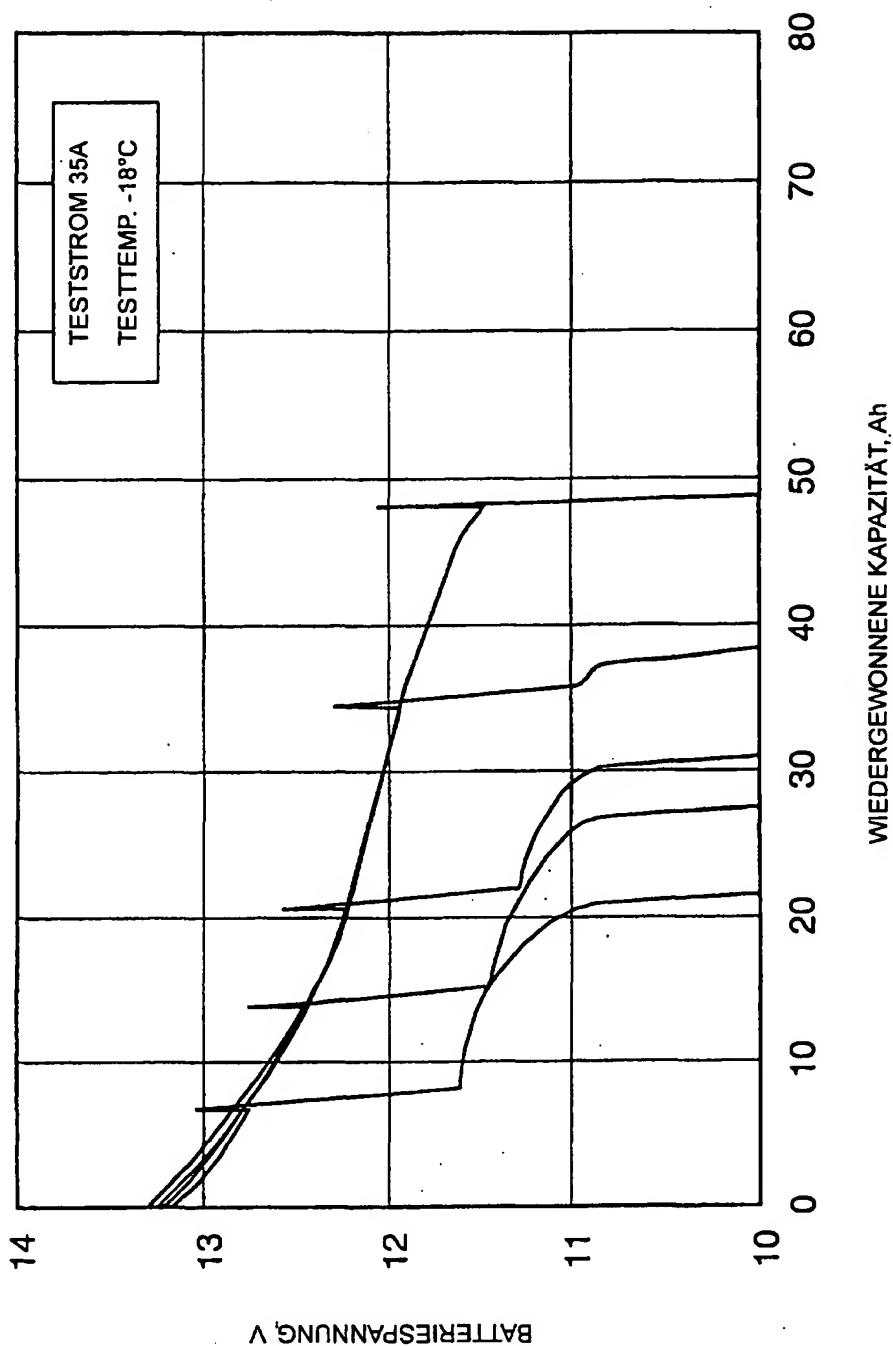


Fig.10.

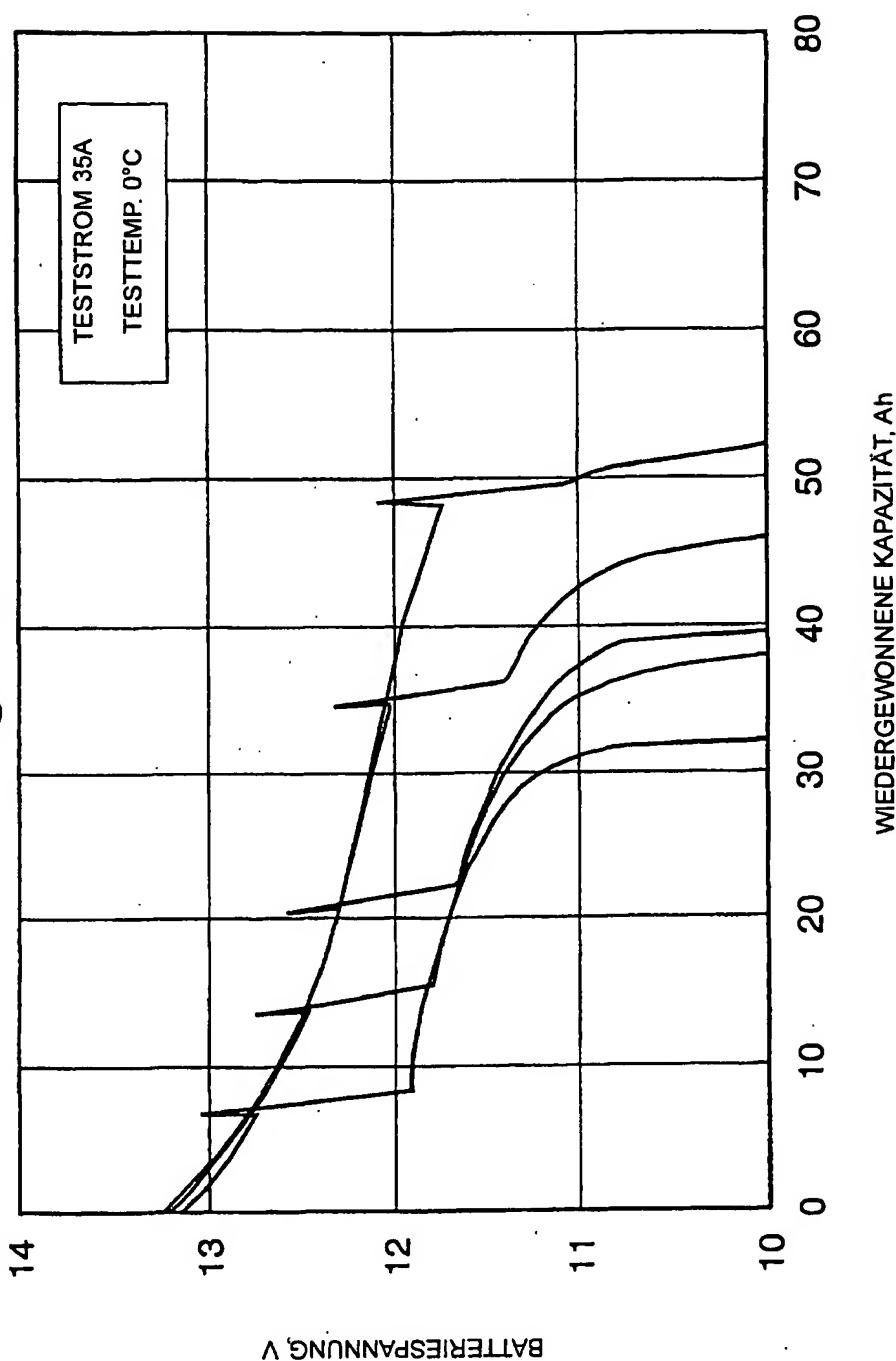


Fig.11.

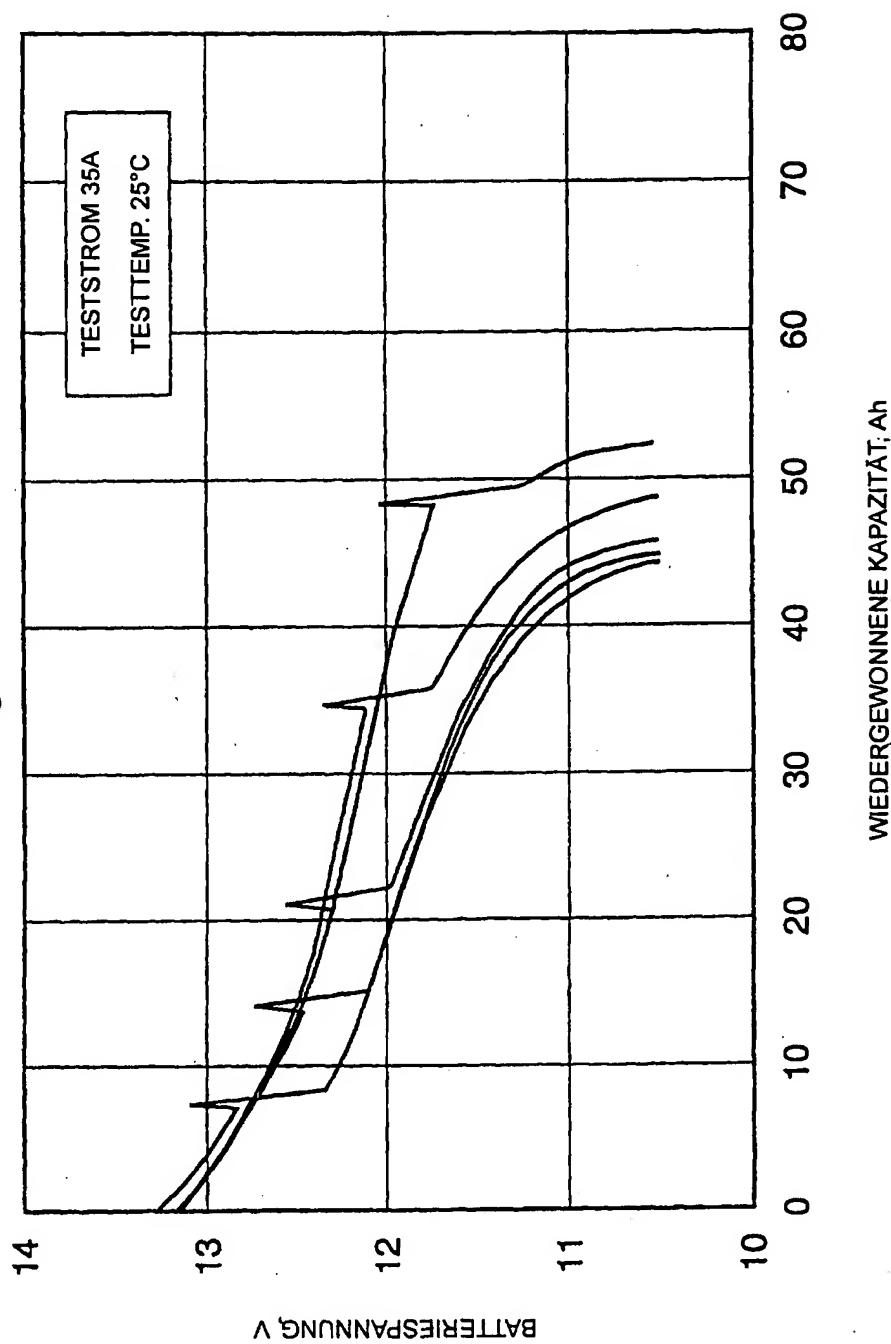


Fig. 12.

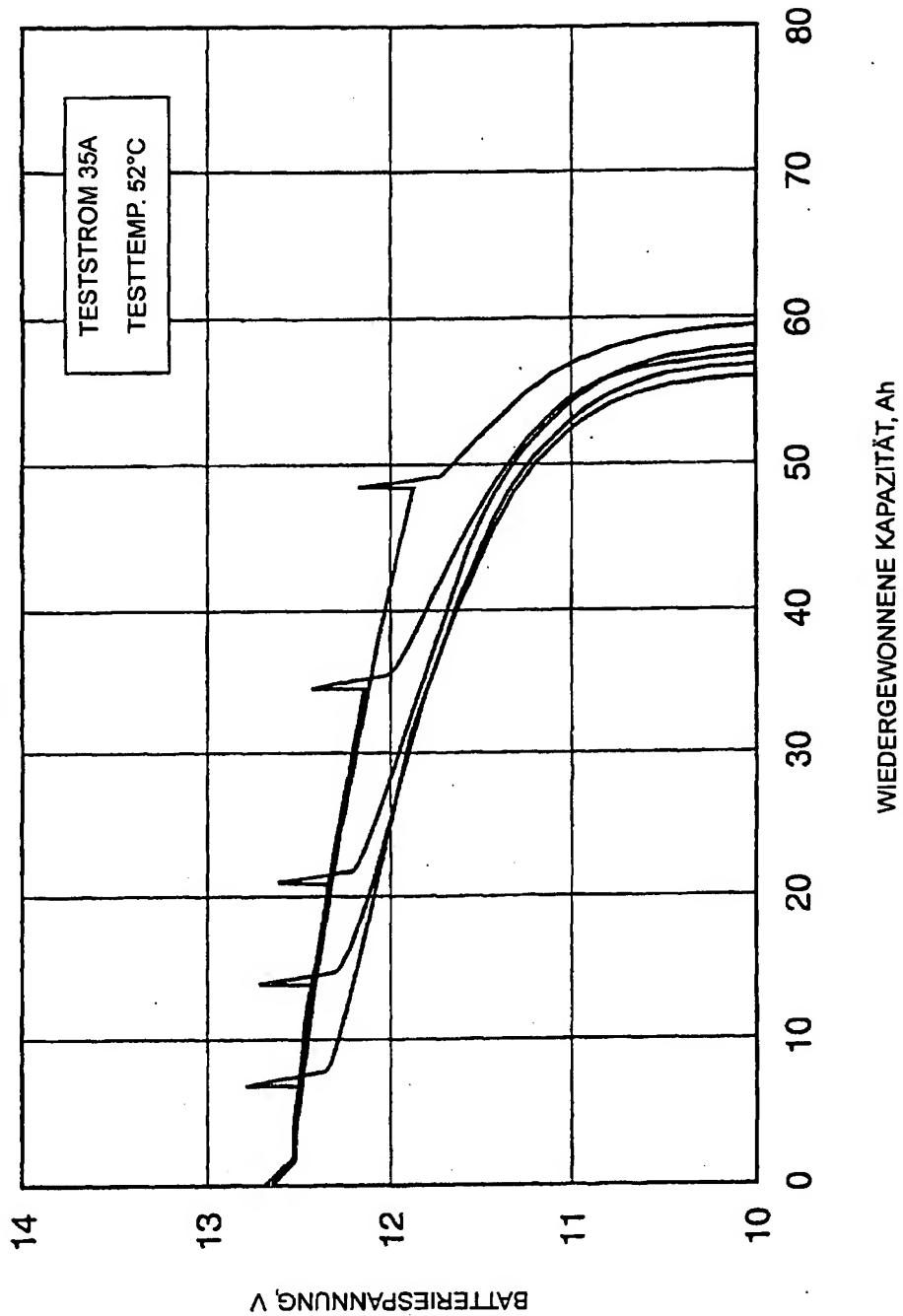
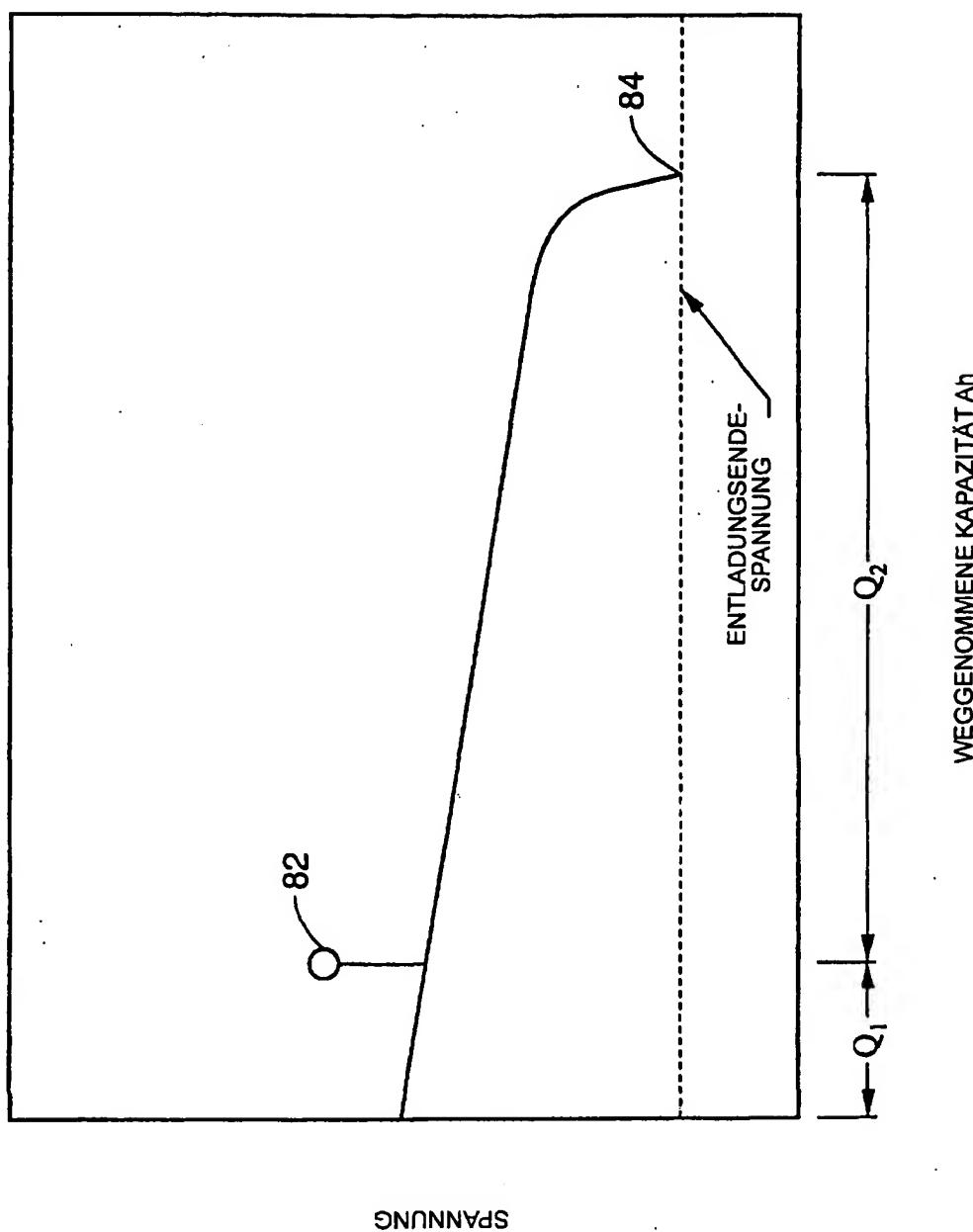
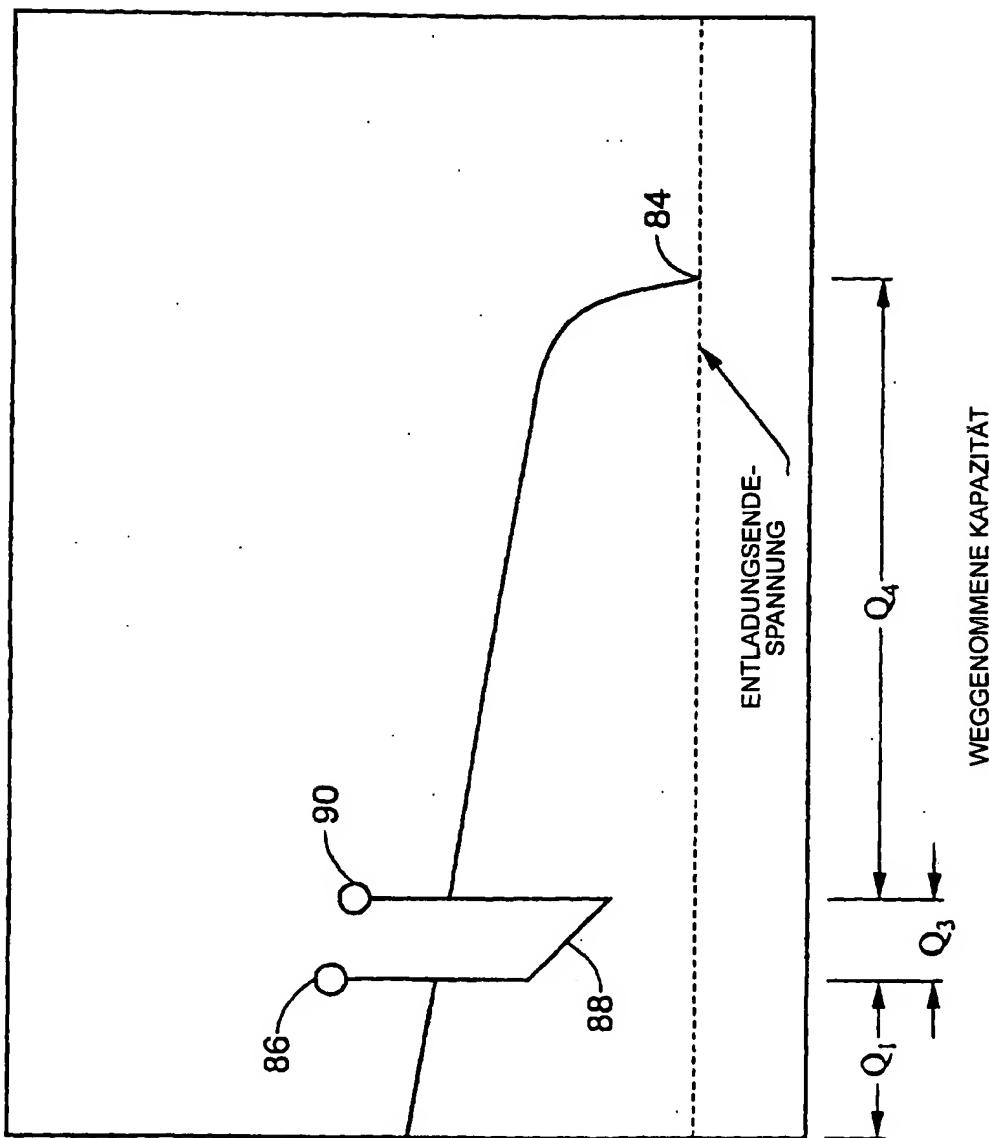


Fig. 13.



SPANNUNG

Fig. 14.



SPANNUNG

Fig. 15.

